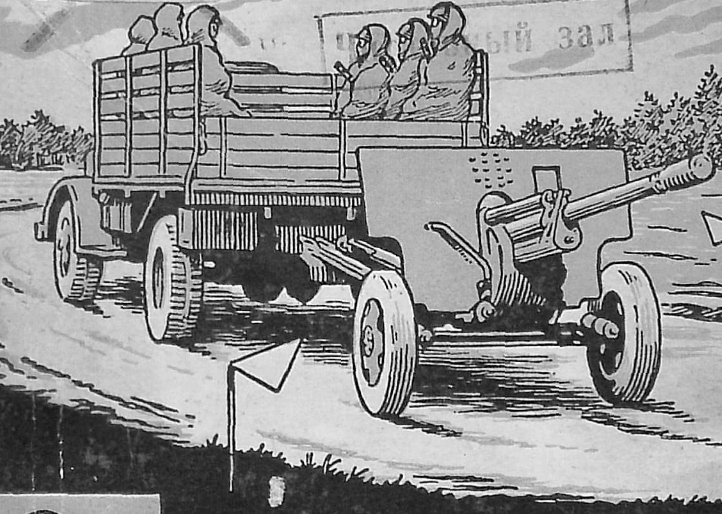


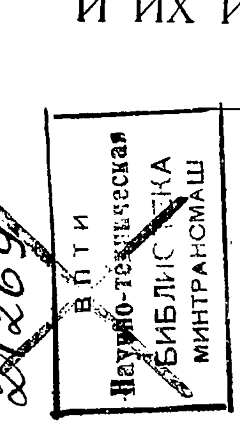
В. П. СЫРНЕВ и Н. П. ПЕТРОВ

РАДИОАКТИВНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И ИХ ИЗМЕРЕНИЯ

ВОЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ СОЮЗА ССР
МОСКВА—1956

В. П. СЫРНЕВ и Н. П. ПЕТРОВ

РАДИОАКТИВНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И ИХ ИЗМЕРЕНИЯ



Военное Издательство
Министерства Обороны Союза ССР
Москва — 1956

СОДЕРЖАНИЕ

Владиллен Павлович Сырнев
и Николай Пантелеймонович Петров

„Радиоактивные излучения и их измерения"

Редактор кандидат технических наук инженер-подполковник *А. И. Седов*
Редактор Издательства *Я. М. Кадер*
Художественный редактор *А. М. Голикова*
Обложка художника Б. С. Иванова
Технический редактор *Н. В. Срибнис*
Корректор *А. А. Карташева*.

Сдано в набор 9.07.55. Подписано к печати 21.12.55
Формат бумаги 70×92 1/32 — 5 печ. л. = 5,85 усл. п. л. 5,859 уч.-изд. л.
Г-15509

Военное Издательство Министерства Обороны Союза ССР
Москва, Тверской бульвар, 18
Изд. № 1/7867. Зак. № 3372

2-я типография имени К. Е. Ворошилова
Управления Военного Издательства Министерства Обороны Союза ССР
Ленинград 65, почтовый ящик № 343

Цена 1 р. 75 к.

ВВЕДЕНИЕ

В этой книге рассказывается о радиоактивных излучениях и методах их обнаружения и измерения на зараженной местности в районе атомного взрыва.

Радиоактивностью называется способность некоторых веществ самопроизвольно испускать невидимые лучи подобно химическому элементу радию. Уже первые работы по изучению радиоактивности, выполненные физиками-экспериментаторами на рубеже XIX и XX столетий, показали, что радиоактивные излучения могут оказывать вредное воздействие на здоровье человека. Опасность поражения этими излучениями усугубляется тем, что они непосредственно невидимы и неощутимы человеком. Поэтому обнаружение и измерение радиоактивных излучений преследуют не только чисто физические или технические цели, но и являются важнейшим мероприятием, предупреждающим поражение людей этими излучениями.

Радиоактивные излучения относятся к группе так называемых ионизирующих излучений, в которую, кроме них, входят ультрафиолетовые, рентгеновские, космические излучения, а также потоки нейтронов и других ядерных частиц. Область физики, занимающаяся обнаружением и из-

мерением ионизирующих излучений, получила название дозиметрии, и соответственно приборы, используемые для этих целей, получили название дозиметрических приборов.

В настоящее время радиоактивные вещества нашли широкое применение в промышленности, сельском хозяйстве, биологии, медицине и т. д., поэтому дозиметрия радиоактивных излучений из области физических исследований превратилась в специальную область техники. Особенно возрастают роль и значение дозиметрии в нашей стране в связи с промышленным использованием атомной энергии, процесс получения которой связан с образованием большого количества радиоактивных веществ.

Как известно, атомное оружие отличается от обычных видов оружия не только значительно большим разрушающим и поражающим действием, но и спецификой своих поражающих факторов. Одной из специфических особенностей атомного оружия является возникновение радиоактивного заражения в районе взрыва. Радиоактивное заражение местности может быть также создано в результате применения специально приготовленных радиоактивных смесей, получивших название боевых радиоактивных веществ (БРВ). Поэтому одним из основных мероприятий противоатомной защиты войск является радиационная разведка, позволяющая своевременно обнаружить радиоактивное заражение местности и оценить опасность пребывания на ней личного состава.

Характерной особенностью радиоактивных веществ является невозможность их обнаружения без дозиметрических приборов. Это объясняется тем, что радиоактивные излучения, испускаемые

этими веществами, как уже отмечалось, невидимы. Сами же радиоактивные вещества также не могут быть обнаружены, так как они, во-первых, не обладают никакими специфическими свойствами (цвет, запах, вкус), а, во-вторых, весовое количество радиоактивных веществ даже при сильном заражении местности составляет ничтожные доли грамма на одном квадратном метре. Поэтому для выполнения поставленных задач радиационная разведка должна иметь в своем распоряжении дозиметрические приборы. С помощью этих приборов можно быстро и с необходимой точностью определить интенсивность радиоактивного излучения, наличие и степень заражения радиоактивными веществами людей, грунта, воздуха, воды, продовольствия, вооружения.

Следует подчеркнуть, что своевременное обнаружение зараженных участков местности и воздуха создает возможность практически полностью устранить потери личного состава, действующего на зараженной местности.

Цель книги — рассказать о сущности дозиметрических измерений, проводимых на радиоактивно зараженной местности, а также о принципах действия и устройстве основных типов дозиметрических приборов. Для более глубокого уяснения методов обнаружения и измерения радиоактивных излучений в книге значительное внимание уделяется рассмотрению свойств радиоактивных излучений.

Верный своей миролюбивой политике, Советский Союз требует запрещения атомного и водородного оружия, как преступного оружия массового уничтожения людей. Но борьба СССР за запрещение атомного оружия встречает яростное

сопротивление агрессивных кругов капиталистических стран.

Империалисты, готовясь к новой мировой войне, пытаются запугать народы мира атомным и водородным оружием. Реакционная пресса, спекулируя на неосведомленности простых людей о действительных свойствах атомного оружия, сочиняет особенно много небылиц о его радиоактивном действии. Однако вой этих писак может запугать слабонервных, а не советских людей. Советские Вооруженные Силы, оснащенные новейшей боевой техникой, атомным и водородным оружием, зорко стоят на страже рубежей нашей родины и готовы нанести сокрушительный удар любому агрессору, если он нарушит мирную жизнь нашего народа.

—— o ——

1. РАДИОАКТИВНОСТЬ

1. Краткие сведения о строении атома и его ядра

Неисчислимое многообразие окружающих нас предметов построено из сравнительно небольшого числа химических элементов. В настоящее время известно 101 химический элемент: водород, азот, кислород, углерод, натрий, железо, ртуть, уран и другие. Большинство веществ, существующих в природе, являются сложными, то есть состоят из нескольких химических элементов.

Всем известное вещество вода является соединением двух элементов: кислорода и водорода. Ткани тела человека состоят из ряда сложных химических веществ, в состав которых входят: водород, кислород, азот, углерод, фосфор и много других элементов.

Многочисленные научные наблюдения и эксперименты убедительно показали, что, в каком бы состоянии вещество ни находилось (жидкость, газ, твердое тело), оно состоит из отдельных мельчайших частиц — молекул. Молекулы имеют необычайно малые размеры. Например, в одном кубическом миллиметре воздуха при нормальной температуре у поверхности земли содержится $2{,}6 \cdot 10^{16}$ молекул.

Различие свойств отдельных химических веществ объясняется тем, что они состоят из разного сорта молекул. Молекула является наименьшей частицей сложного вещества, которая еще обладает химическими свойствами этого вещества. Хотя молекулы чрезвычайно малы, они вовсе не являются неделимыми. Молекулы сами являются сложными образованиями, состоящими из более мелких частиц вещества — атомов. Комбинируясь различным способом, атомы образуют молекулы.

Атом — наименьшая частица химического элемента, обладающая теми же химическими свойствами, что и сам элемент. Каждый элемент состоит из определенного сорта атомов, поэтому в соответствии с общим числом известных химических элементов число различных атомов в настоящее время достигает 101.

Атом не является мельчайшей известной нам частицей вещества, он — сложное образование, состоящее из еще более мелких частиц, названных элементарными, — электронов, протонов и нейтронов.

Электрон — отрицательно заряженная частица. Масса электрона возрастает с увеличением скорости и может быть определена по формуле

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}},$$

где c — скорость распространения света в пустоте — 300 000 $\frac{км}{сек}$;

m_0 — масса покоя электрона, то есть масса при скорости, равной нулю;

v — скорость движения электрона.

Масса покоя электрона, выраженная в граммах, равна $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-28}$ г и приблизительно в 1800 раз меньше массы наиболее легкого из атомов — атома водорода. Электрический заряд электрона является наименьшим количеством электричества, встречающимся в природе, причем абсолютная величина всякого заряда, как положительного, так и отрицательного, всегда кратна заряду электрона. Вот почему заряд электрона часто называется элементарным. Это обстоятельство, в частности, обусловило выбор единицы измерения электрического заряда в атомной физике, в качестве которой взят заряд электрона. Такая единица заряда обозначается буквой е.

Как известно, в практической системе единиц за единицу заряда выбран кулон. Кулон есть количество электричества, переносимое за одну секунду током в один ампер. Заряд электрона е, выраженный в кулонах, равен

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ кулона.}$$

Электростатическая единица количества электричества равна:

$$1 \text{ CGSE} = 0,3 \cdot 10^{-9} \text{ кулона,}$$

поэтому

$$e = 4,8 \cdot 10^{-10} \text{ CGSE.}$$

Атом любого элемента состоит из ядра, заряженного положительным электричеством, и электронов, которые вращаются вокруг ядра. Все сорта атомов в определенной последовательности расположены в периодической таблице элементов великого русского ученого Д. И. Менделеева, причем атом с порядковым, или атомным, номе-

ром Z в этой таблице имеет положительный заряд ядра, равный Z · e.

Обычно атомы электрически нейтральны, так как положительный заряд ядра уравновешивается отрицательным зарядом электронов. Отсюда следует, что и заряд электронов в нейтральном атоме равен Ze, поэтому число электронов в атоме равно числу положительных зарядов Z ядра. Таким образом, можно сказать, что порядковый номер атома в периодической таблице равен числу электронов, вращающихся вокруг ядра. Например, в атоме водорода, имеющем порядковый номер Z = 1, — один электрон, а в атоме элемента уран (Z = 92) — 92 электрона.

Область, в которой вращаются электроны около ядра, называется электронной оболочкой атома. Электроны в оболочке располагаются не на одном расстоянии от ядра, а слоями, причем в каждом слое может находиться лишь определенное число электронов. В ближайшем к ядру слое, получившем название К-слой, может находиться не более двух электронов, во втором, более удаленном слое (L-слой) — не более восьми электронов, в третьем слое (М-слой) — не более 18 электронов и т. д. Каждый слой электронной оболочки для данного сорта атомов удален от ядра на вполне определенное расстояние. Поэтому принято говорить, что электроны в атоме могут вращаться вокруг ядра лишь на «разрешенных» расстояниях.

Расстояния от ядра до ближайших слоев электронной оболочки значительно превышают размеры ядер. Так, для атома водорода расстояние между ядром и электроном имеет величину порядка 10^{-8} см, что в несколько десятков тысяч раз больше радиуса ядра.

У более сложных атомов радиус внутренних слоев обратно пропорционален атомному номеру Z. Поэтому даже для атомов с большими атомными номерами Z отношение радиуса внутреннего слоя к радиусу ядра составляет все еще несколько сотен. Наличие в атоме целого ряда «разрешенных» слоев (K, L, M, N и т. д.) вовсе не означает, что все они заполнены электронами.

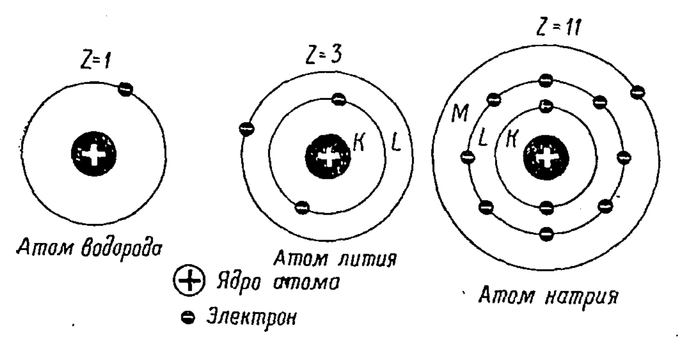


Рис. 1. Схемы строения атомов водорода, лития и натрия

Обычно у атома все Z электронов располагаются на ближайших к ядру «разрешенных» слоях; как мы увидим далее, такое размещение электронов соответствует их наиболее крепкой связи с ядром.

На рис. 1 показаны схемы строения атомов водорода, лития и натрия.

Советским физиком Д. Д. Иваненко впервые было высказано предположение, что ядро атома имеет сложное строение и в состав его входят только два типа элементарных частиц: протоны и нейтроны.

Протон представляет собой положительно заряженную частицу, нейтрон — частицу, не имею-

щую заряда. Заряд протона по величине равен заряду электрона. Массы нейтрона и протона приблизительно равны и примерно в 1800 раз больше, чем масса электрона.

Линейные размеры ядра приблизительно в 10 000 раз меньше размеров атома, в то же время практически вся масса атома сосредоточена в ядре, поэтому пространство, приходящееся на каждый атом, почти совершенно не заполнено веществом.

Заряд ядра равен сумме зарядов протонов, так как в ядре только они являются заряженными частицами. Отсюда следует, что число протонов в ядре равно порядковому номеру Z.

Ядро атома водорода имеет простейшее строение, оно состоит из одного протона ($Z = 1$), поэтому атом водорода занимает первое место в таблице Менделеева. Вокруг ядра этого атома вращается один электрон.

Второе место в таблице занимает элемент гелий. Ядро атома гелия имеет положительный заряд, равный двум единицам, то есть в состав этого ядра входят два протона ($Z = 2$). Кроме того, в ядро гелия входят два нейтрона. В электронной оболочке атома гелия находятся два электрона.

Третье место в таблице Менделеева занимает элемент литий, в состав ядра атома лития входят три протона ($Z = 3$) и четыре нейтрона, и в электронной оболочке находятся три электрона.

Девяносто второе место в таблице Менделеева занимает элемент уран. В состав ядра атома урана входят 92 протона, и соответственно этому в электронной оболочке имеются 92 электрона.

Кроме величины заряда ядра, важнейшей характеристикой атома является его масса. Истин-

ная масса атомов в граммах выражается крайне малыми числами, поэтому для удобства пользуются относительным атомным весом (массой), за единицу которого принята $^1/_{16}$ часть веса атома кислорода. Атомная единица массы [1], выраженная в граммах, равна $1,66 \cdot 10^{-24}$ г. Например, масса атома водорода в этих единицах равна 1,008, масса атома гелия — 4,003 и т. д.

Масса атома, округленная до целых чисел, называется массовым числом — A. Массовое число водорода A = 1, гелия A = 4 и т. д. Массовое число равно числу протонов и нейтронов, входящих в состав ядра, поэтому число нейтронов в ядре равно N = A — Z.

Существует много атомов, ядра которых содержат равное число протонов, но разное число нейтронов. Массовые числа у этих атомов различны, но их химические свойства одинаковы, так как они имеют один и тот же заряд ядра и, следовательно, занимают одно и то же место в таблице Менделеева. Такие атомы получили название изотопов. Само слово «изотоп» происходит от греческих слов «изос» — равный и «топос» — место.

Все химические элементы имеют по несколько изотопов. Например, элемент водород имеет три изотопа: легкий водород — протий (A = 1), тяжелый водород — дейтерий (A = 2) и сверхтяжелый водород — тритий (A = 3). В состав ядер этих трех изотопов входит по одному протону, число же нейтронов соответственно равно 0, 1, 2 (рис. 2). Элемент уран имеет 11 изотопов, элемент кислород — 6 изотопов и т. д.

---

[1] Сокращенно атомную единицу массы обозначают — аем.

Для обозначения изотопа элемента в дальнейшем наряду с названием элемента или его химическим символом будет указываться массовое число изотопа.

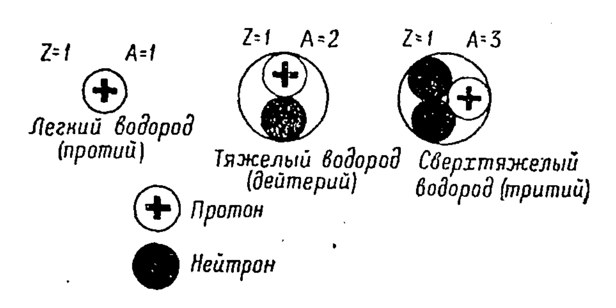


Рис. 2. Схемы строения ядер атомов изотопов водорода

Например, натрий 24 (Na^{24}), что означает изотоп элемента натрия с массовым числом $A = 24$; уран 235 (U^{235}) — изотоп элемента урана с массовым числом $A = 235$ и т. д.

2. Радиоактивный распад атомов

В 1896 году французским физиком Беккерелем было установлено, что химические соединения элемента урана испускают какие-то невидимые лучи. Под действием этих лучей воздух становился проводником электрического тока, они вызывали почернение фотопластинки и свечение некоторых веществ. Изучением природы этих излучений занялись талантливые физики Пьер Кюри и Мария Кюри-Склодовская. Два года спустя ими был открыт новый элемент, создававший более сильное излучение, чем соединения

урана. Этому элементу было дано наименование радий, что означает — лучистый. С тех пор способность некоторых веществ испускать невидимые лучи подобно радию получила название радиоактивность. Позднее в результате многочисленных научных исследований было установлено, что радиоактивные излучения испускаются ядрами атомов в момент их самопроизвольного превращения (распада) в ядра атомов другого элемента.

В настоящее время известно более 700 радиоактивных изотопов, причем лишь 18 из них существуют в природе, а остальные были получены искусственно. Искусственная радиоактивность была открыта в 1934 году Ирен и Фредериком Жолио-Кюри. Они установили, что в результате бомбардировки некоторых атомных ядер ядрами элемента гелия возникают радиоактивные изотопы таких химических элементов, которые в обычных условиях устойчивы и радиоактивностью не обладают. В настоящее время лабораторным путем приготовляются радиоактивные изотопы всех без исключения известных химических элементов, а также элементы, не найденные в природе и занимающие 93—101 места в таблице Менделеева. Искусственные радиоактивные изотопы в лабораторных условиях получаются путем бомбардировки ядер атомов стабильных изотопов нейтронами, протонами, дейтеронами (ядра тяжелого водорода) и ядрами гелия. Для разгона протонов, ядер гелия и других заряженных частиц используются специальные установки (циклотроны, бетатроны и др.). В очень больших количествах искусственные радиоактивные изотопы могут быть получены в атомных котлах, где они возникают в результате деления тяжелых ядер (уран, плутоний) или при

облучении стабильных изотопов потоком нейтронов. Мощным источником искусственных радиоактивных веществ является атомный взрыв, о нем мы будем подробнее говорить в главе IV.

Существуют следующие виды радиоактивного распада: α[1]-распад — испускание ядром α-частицы. α-частица представляет собой ядро атома гелия, состоящее из двух протонов и двух нейтронов, то есть имеет положительный заряд, равный двум электронам, а массовое число А = 4. При испускании α-частицы исходный атом превращается в новый атом, имеющий заряд ядра на две единицы, а массовое число на четыре единицы меньше, чем у исходного ядра.

Таким образом, α-распад может быть представлен следующей схемой:

$$\alpha\text{-распад}\begin{cases} A \rightarrow A-4 \\ Z \rightarrow Z-2 \end{cases}$$

Например, атомы изотопа плутония 239 путем α-распада превращаются в атомы изотопа урана 235, ядра которого имеют заряд на две единицы, а массовое число на четыре единицы меньше, чем у ядра плутония. Схема радиоактивного превращения плутония в уран изображена на рис. 3.

Поток положительно заряженных α-частиц, испускаемый радиоактивными веществами, принято называть α-лучами, а вещества, испускающие эти лучи, — α-активными.

β[2]-распад — испускание ядром β-частицы, представляющей собой электрон или

[1] α (альфа) — первая буква греческого алфавита.
[2] β (бета) — вторая буква греческого алфавита.

позитрон. Позитрон — положительно заряженная частица, имеющая массу, равную массе электрона, и заряд, равный по абсолютной величине заряду электрона.

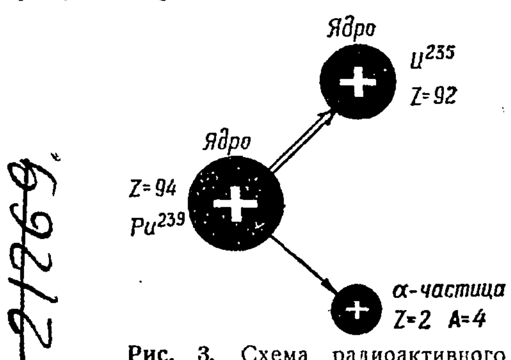


Рис. 3. Схема радиоактивного превращения плутония 239

При испускании электрона исходный атом превращается в другой атом, имеющий заряд ядра на одну единицу больше, так как потеря одного отрицательного заряда равноценна приобретению одного положительного заряда. Масса электрона мала (0,0005 аем), поэтому массовое число у вновь образованного ядра остается тем же, что и у исходного ядра. Электронный бета-распад описывается следующей схемой:

$$\beta\text{-распад} \begin{cases} A \to A \\ Z \to Z + 1 \end{cases}$$

На рис. 4 показана схема радиоактивного распада ядра атома натрия 24, который путем испускания электрона превращается в ядро атома магния, имеющего заряд на одну единицу больше.

Утверждение о том, что из ядра натрия 24 вылетает электрон, может вызвать возражение читателя, так как в ядре нет электронов. Тем не менее это утверждение не ошибочно. Дело в том,

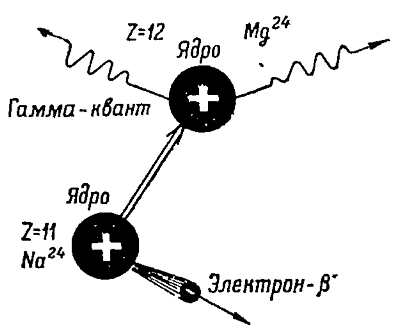


Рис. 4. Схема радиоактивного превращения натрия 24

что нейтроны и протоны, из которых состоит ядро, могут при определённых условиях превращаться друг в друга. Вылет электрона сигнализирует о том, что один из нейтронов превратился в протон.

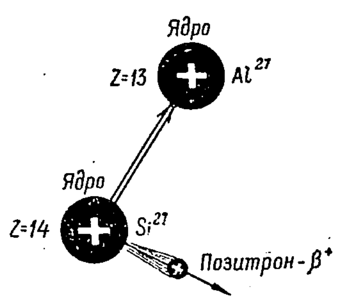


Рис. 5. Схема радиоактивного превращения кремния 27

При испускании позитрона исходный атом превращается в другой атом, имеющий заряд на одну единицу меньше, так как в результате позитронного бета-распада один из протонов ядра превращается в нейтрон.

На рис. 5 приведена схема радиоактивного

превращения кремния 27, который в результате испускания позитрона превращается в алюминий 27.

Поток бета-частиц принято называть бета-лучами, а радиоактивные вещества, испускающие эти лучи, — бета-активными веществами.

Бета- и альфа-распад у многих радиоактивных веществ сопровождается еще одним видом радиоактивного излучения — гамма-лучами[1]. Гамма-лучи подобны рентгеновским лучам и представляют собой невидимое электромагнитное излучение. На рис. 6 изображена шкала электромагнитных излучений, обнаруженных человеком в природе. К ним относятся радиоволны, инфракрасные лучи, видимые лучи, ультрафиолетовые лучи, рентгеновские лучи, гамма-лучи. Часто электромагнитные излучения объединяют под общим названием — свет. Скорость распространения для всех электромагнитных излучений одинакова и в пустоте составляет c = 300 000 км/сек. Различие в свойствах излучений (в частности, для ви-

[1] γ (гамма) — третья буква греческого алфавита.

Длина волны в см

10^1 — 10^0=1см — 10^{-1}=1мм — 10^{-2} — 10^{-3} — 10^{-4} — 10^{-5} — 10^{-6} — 10^{-7} — 10^{-8} — 10^{-9} — 10^{-10} — 10^{-11}

Радиоволны; Инфракрасные лучи; Ультрафиолетовые лучи; Рентгеновские лучи; Гамма-лучи

Заштрихованная область соответствует видимому свету

Рис. 6. Шкала электромагнитных излучений. Заштрихованная область соответствует видимому свету

димого света — в цвете) определяется различием длины волны. Из рис. 6 видно, что гамма-лучи имеют длину волны приблизительно от $3 \cdot 10^{-9}$ см до сколь угодно малых и являются наиболее коротковолновым электромагнитным излучением.

Современные достижения физики показывают, что электромагнитные излучения существуют в виде отдельных порций-фотонов, которые неделимы для излучения данной длины волны. Отсюда следует, что ядра радиоактивных атомов испускают гамма-лучи отдельными фотонами. Каждый фотон обладает определенным квантом (порцией) энергии, поэтому фотоны часто называют квантами. Гамма-квант не имеет электрического заряда, поэтому при его испускании заряд ядра остается неизменным и, следовательно, радиоактивный распад атома не происходит. Гамма-кванты излучаются ядрами атомов в том случае, когда вновь образованное ядро после альфа- или бета-распада обладает избытком энергии; переходя в состояние с меньшей энергией, ядро излучает избыточную энергию в виде энергии одного или нескольких квантов. Например, бета-распад натрия 24 (рис. 4) сопровождается излучением двух гамма-квантов.

К-захват — это радиоактивное превращение, которое, как и позитронный бета-распад, было открыто при изучении искусственной радиоактивности. При К-захвате радиоактивное ядро захватывает один из электронов К-слоя, вследствие чего один из протонов ядра превращается в нейтрон, при этом заряд ядра уменьшается на одну единицу. Этот вид радиоактивного распада часто сопровождается испусканием гамма-квантов. На рис. 7 показана схема радиоактивного распада ядра атома марганца 54, который путем

К-захвата превращается в ядро атома хрома 54, причем каждый распад атома сопровождается излучением одного гамма-кванта.

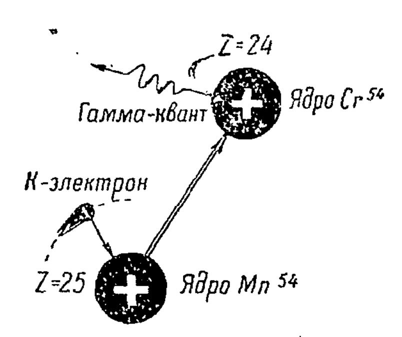


Рис. 7. Схема радиоактивного превращения марганца 54

3. Закон радиоактивного распада

Радиоактивный распад происходит не сразу у всех атомов, а постепенно. Каждую секунду из общего числа радиоактивных атомов распадается только определенная часть. Но каждый радиоактивный атом рано или поздно претерпевает превращение. Закон, по которому уменьшается количество радиоактивных атомов, прост: половина любого количества атомов данного радиоактивного вещества распадается через одинаковое время. Поэтому для характеристики распада радиоактивного элемента принято пользоваться величиной, называемой периодом полураспада. Период полураспада T — это промежуток времени, в течение которого распадается половина начального количества атомов.

Период полураспада для различных радиоак-

тивных изотопов колеблется в широких пределах от ничтожных долей секунды до многих миллиардов лет.

Например, период полураспада радиоактивного натрия 24 равен 15 часам. Если взять некоторое количество радиоактивного натрия, то через время, равное 15 часам, останется половина радиоактивных атомов, через время, равное двум периодам полураспада (2T = 30 часов), их останется четверть, через время, равное трем периодам полураспада (3T = 45 часов), — $^1/_8$ часть и т. д.

Период полураспада плутония 239 велик, он равен 24 000 лет. Лишь через 24 000 лет распадется половина атомов взятого количества плутония. Уран 235 имеет еще больший период полураспада — 890 миллионов лет. Зная период полураспада радиоактивного изотопа, нетрудно определить число нераспавшихся радиоактивных атомов для любого момента времени:

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}, \qquad (1)$$

где N_0 — первоначальное количество радиоактивных атомов;

N — количество нераспавшихся атомов;

t — время, прошедшее с момента, когда число атомов равнялось N_0.

На рис. 8 показана кривая радиоактивного распада, построенная по формуле (1). Эта кривая, если время распада выражать в периодах полураспада (по горизонтальной оси откладывать отношение t/T), а по вертикальной оси откладывать отношение $\frac{N}{N_0}$, для всех радиоактивных изотопов одинакова.

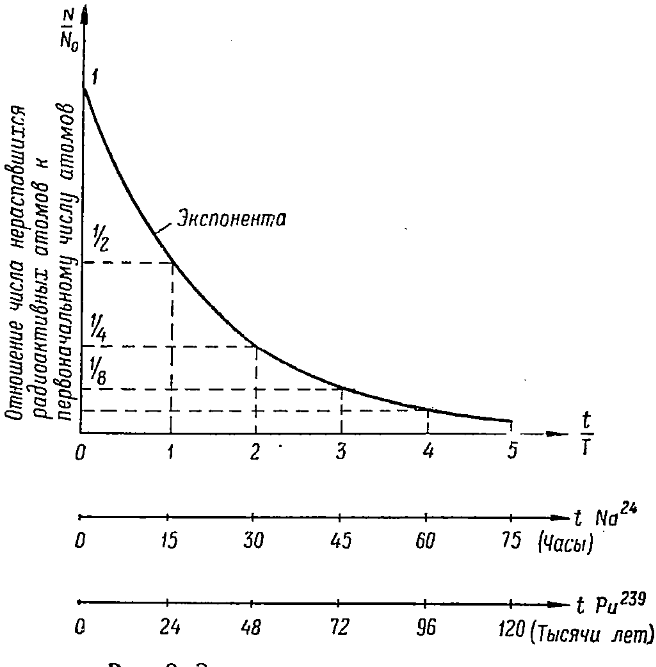


Рис. 8. Закон радиоактивного распада

Закон радиоактивного распада обычно записывают в виде

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \tag{2}$$

где e — основание натуральных логарифмов, равное 2,718..., для приближенных расчетов принимают e = 2,7;

λ — постоянная радиоактивного распада, имеющая, как и период полураспада T, для каждого радиоактивного изотопа вполне определенное значение. Связь

между постоянной λ и периодом полураспада T легко найти, если приравнять правые части выражений (1), (2):

$$T = \frac{0,693}{\lambda}.$$

Кривая, определяемая выражением (2) и изображенная на рис. 8, называется экспонентой, поэтому говорят, что радиоактивный распад происходит по экспоненциальному закону.

Скорость радиоактивного распада не зависит от физических и химических условий, иначе говоря, отсутствуют средства, с помощью которых можно было бы ускорить или задержать радиоактивный распад. Следует отметить, что закон радиоактивного распада имеет статистический характер, то есть он справедлив лишь при наличии большого числа распадающихся атомов.

4. Единица количества радиоактивного вещества

Количество атомов, распадающихся за одну секунду, называется активностью радиоактивного вещества. Чем больше имеется атомов радиоактивного вещества и чем меньше их период полураспада, тем больше активность вещества. Если период полураспада T выразить в секундах, а через N обозначить число радиоактивных атомов, то активность вещества Q равна

$$Q = 0,693 \cdot \frac{N}{T}.$$

О количестве радиоактивного вещества судят не по его весу, выраженному в граммах, а по его активности. Это объясняется тем, что операция взвешивания радиоактивного вещества даже в лабораторных условиях чрезвычайно затруднена,

так как его масса обычно ничтожно мала и, кроме того, как правило, радиоактивный изотоп находится в смеси с другими веществами, в том числе и нерадиоактивными.

За единицу активности и, следовательно, количества радиоактивного вещества принята единица, получившая название кюри.

Кюри — это такое количество радиоактивного вещества, в котором происходит 37 миллиардов распадов атомов за 1 секунду.

Каждый распад атома сопровождается испусканием альфа- или бета-частицы, поэтому активность в 1 кюри соответствует испусканию радиоактивным веществом в течение одной секунды 37 миллиардов бета- или альфа-частиц.

Число гамма-квантов, приходящихся на один распад, может быть различным. Например, у изотопа Co^{60} каждый распад атома сопровождается излучением двух гамма-квантов, у изотопа марганца 54 (Mn^{54}) распад атома сопровождается излучением одного гамма-кванта и т. д. Поэтому для определения числа гамма-квантов, испускаемых гамма-активным веществом, кроме величины активности, выраженной в кюри, необходимо знать число гамма-квантов, приходящихся на один распад атома.

Чем больше период полураспада и массовое число радиоактивного изотопа, тем большее весовое количество радиоактивного вещества соответствует одному кюри. Весовое количество радиоактивных атомов, имеющих активность 1 кюри, можно определить по формуле:

$$M = 0{,}89 \cdot 10^{-13} A \cdot T \text{ грамм}, \quad (3)$$

где A — массовое число,

T — период полураспада в секундах.

1 кюри урана 235 имеет вес около 570 кг, такое количество урана занимает объем куба с длиной ребра, равной примерно 31 см.

1 кюри плутония 239 имеет вес около 16 г и занимает примерно объем кубика с ребром в 1 см.

Кюри радия весит один грамм и занимает объем небольшой горошины.

1 кюри кобальта 60, имеющего период полураспада $T = 5$ лет, — это крупинка металла весом около одной тысячной доли грамма.

Особенно малое весовое количество соответствует одному кюри радиоактивных веществ, период полураспада которых исчисляется часами или минутами. Один кюри натрия 24 имеет вес около одной десятимиллионной доли грамма. Однако практически всегда радиоактивное вещество находится в смеси с нерадиоактивными веществами; весовое количество такой смеси, соответствующее активности в один кюри, может быть значительно больше, чем вычисленное по формуле (3). Например, один кюри кобальта 60, находящегося в смеси с нерадиоактивным кобальтом 59, может весить более одного грамма.

—— o ——

II. СВОЙСТВА РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

1. Единица измерения энергии радиоактивных излучений

Энергию радиоактивных излучений измеряют в специальных единицах. За единицу энергии в атомной физике принят электронвольт. Это такая энергия, которую приобретает электрон, проходя в электрическом поле разность потенциалов, равную одному вольту. Производной единицей является мегаэлектронвольт (обозначается мэв), равный одному миллиону электронвольт.

В мире окружающих нас больших тел электронвольт очень небольшая энергия; например, для того, чтобы нагреть 1 грамм воды всего лишь на одну тысячную градуса, необходимо затратить тепловую энергию, равную 26 миллиардам мегаэлектронвольт! Однако в мире атома электронвольт значительная единица энергии. При нормальных условиях атомы и молекулы различных тел обладают тепловой энергией, измеряемой сотыми долями электронвольта. Например, если бы каждая молекула воды приобрела тепловую энергию, равную 1 эв, то температура воды поднялась бы до 1,3 тысячи градусов! Энергия квантов видимого солнечного света — световых фото-

нов — составляет всего лишь несколько электронвольт, вылетающие же из ядер атомов бета-, альфа-частицы и гамма-кванты могут иметь энергию, равную нескольким миллионам электронвольт. Поэтому радиоактивные излучения в отличие от световых лучей являются излучениями больших энергий. Энергию радиоактивных излучений принято измерять в мегаэлектронвольтах.

2. Ионизация и возбуждение атомов

Современной атомной физикой установлено, что электроны в атоме могут иметь лишь строго определенные величины энергии, или, как еще говорят, «разрешенные» уровни энергии, причем каждому слою электронной оболочки соответствует свой уровень энергии электрона. С переходом электрона на более удаленный от ядра слой энергетический уровень электрона возрастает за счет увеличения его потенциальной энергии. Эта энергия возрастает по мере удаления электрона от ядра так же, как возрастает потенциальная энергия камня с увеличением высоты подъема над поверхностью земли. Однако отличие состоит в том, что в первом случае действуют силы электрического притяжения электрона к ядру, а во втором случае — сила тяжести и, кроме того, при переходе от слоя к слою энергия электрона меняется не постепенно, а скачком.

Для изображения уровней энергии электрона, соответствующих различным слоям, принято пользоваться схемой, изображенной на рис. 9, относящейся к атому водорода. Каждому возможному значению уровня энергии соответствует горизонтальная линия. Верхняя горизонтальная линия изображает уровень энергии бесконечно удален-

ного электрона, уровень энергии которого совершенно условно принят за нулевой, тогда уровни энергии всех электронов, находящихся не на бесконечно большом расстоянии, будут меньше нуля, т. е. выражаются отрицательными числа-

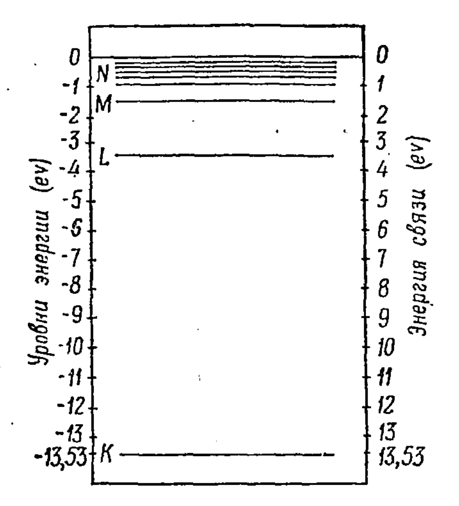


Рис. 9. Уровни энергии атома водорода

ми. Нижняя горизонтальная линия соответствует уровню энергии электрона, находящегося в слое *К*. Этот электрон обладает минимально возможным уровнем энергии. Расстояние между горизонтальными линиями пропорционально разности энергии электронов для соответствующих слоев.

Электронная оболочка атома представляет собой устойчивую систему. Это выражается в том, что никогда не наблюдается самопроизвольный

перескок электрона из одного слоя в другой или отрыв его от атома. Такой переход электронов может осуществиться лишь при поглощении атомом энергии извне. Наиболее прочно с ядром связаны электроны, находящиеся в К-слое, которому соответствует минимальный энергетический уровень электронов в атоме. Отсюда следует, что чем меньше энергия электронов в атоме, тем более прочно они связаны с ядром. Атом находится в устойчивом состоянии, когда электроны последовательно заполняют энергетические уровни *K*, *L*, *M*, *N*... слоев, ибо в этом случае электроны наиболее прочно связаны с ядром, а сам атом обладает минимально возможным уровнем энергии. Энергия, которую необходимо затратить для перевода электрона в более удаленный слой, равна разности величин соответствующих энергетических уровней. Например, для перевода электрона атома водорода из слоя *K* в слой *L* необходимо затратить энергию, равную 10,2 эв.

Процесс перехода электронов на более высокий энергетический уровень называется возбуждением атома. Атом не может находиться длительное время в возбужденном состоянии, электрон в среднем через 10^{-8} сек. опускается на прежний более низкий энергетический уровень, при этом избыточная энергия излучается атомом в виде кванта светового или рентгеновского излучения.

Энергия, необходимая для полного удаления электрона из атома без сообщения ему кинетической энергии, называется энергией связи электрона в атоме. Если принять энергетический уровень бесконечно удаленного электрона за нулевой, то энергия связи электрона по абсолютной величине равна его энергетическому уровню. Наибольшей энергией связи обладают электроны,

находящиеся в слое K. Электроны более удаленных слоев имеют меньшую энергию связи, так как, во-первых, на них действуют меньшие силы электрического притяжения к ядру; во-вторых, эти силы уменьшаются силами отталкивания электронов внутренних слоев. Из рис. 9 видно, что для отрыва электрона слоя K от атома водорода необходимо затратить не менее 13,5 эв. Энергия связи электрона слоя K в атоме с атомным номером Z приблизительно в Z^2 раз больше энергии связи электрона в атоме водорода. Например, для атома элемента вольфрама ($Z = 74$) эта энергия равна примерно 70 000 эв, для свинца ($Z = 82$) — 88 000 эв.

Энергию связи внешних (валентных) электронов принято называть ионизационным потенциалом. Величина ионизационного потенциала периодически зависит от атомного номера, причем наибольшее значение он принимает у инертных газов (He, Ar и т. д.), а минимальное — у щелочных металлов (Li, Na, K и др.). Величина ионизационного потенциала в зависимости от сорта атома лежит в пределах от 4 до 25 эв.

Ионизацией среды называется превращение нейтральных атомов (молекул) в заряженные частицы. Атом может быть ионизирован в результате отрыва от него одного или нескольких электронов (в последнем случае ионизация называется многократной). Атом, потерявший электроны, называется положительным ионом. Положительный заряд такого иона равен по величине заряду потерянных электронов.

Процессы ионизации и возбуждения атомов могут происходить в результате поглощения атомами энергии гамма-, рентгеновских, ультрафиолетовых, видимых лучей, энергии быстродвижу-

щихся α-частиц, протонов, электронов и других заряженных частиц. Ионизация атомов среды возможна также при нагреве ее до высоких температур (термическая ионизация). Для радиоактивных излучений процесс ионизации является наиболее характерным результатом их взаимодействия с атомами среды.

Атому в процессе ионизации может сообщаться энергия большая, чем энергия связи выбитого электрона. В этом случае электрон и образующийся положительный ион за счет избытка энергии получат кинетическую энергию. Если их кинетическая энергия достаточно велика, они могут в свою очередь производить ионизацию атомов среды. Например, ионизация, вызванная вторичными, третичными и т. д. электронами, для γ-излучений является основным процессом ионизации.

Образовавшиеся в результате процесса ионизации свободные электроны могут в течение некоторого времени двигаться в междуатомном пространстве. В газах свободные электроны в конце концов захватываются либо положительными ионами, либо «прилипают» к нейтральным атомам.

В первом случае положительный ион, захвативший электрон, превращается в нейтральный атом. Этот процесс восстановления атомов называется рекомбинацией. Во втором случае нейтральный атом или молекула, к которым «прилип» электрон, превращаются в отрицательный ион, который в свою очередь может рекомбинировать с положительным ионом. Если процесс ионизации сопровождается поглощением энергии, то процесс рекомбинации — освобождением энергии. Освободившуюся в результате рекомбинации

энергию атом испускает в виде квантов рентгеновского, ультрафиолетового и видимого излучения.

Средняя энергия, затрачиваемая радиоактивным излучением на образование одной пары ионов, называется средней работой ионизации. Величина потенциала ионизации значительно меньше величины средней работы ионизации, так как энергия излучения может расходоваться не только на ионизацию, но и на возбуждение атомов среды и другие процессы. Средняя работа ионизации зависит от рода ионизируемой среды, вида радиоактивного излучения и других факторов. В воздухе для всех радиоактивных излучений среднюю работу ионизации ориентировочно можно считать равной 33 эв.

3. Свойства альфа-лучей

Альфа-частицы испускаются почти исключительно ядрами тяжелых элементов. Источником альфа-лучей при атомном взрыве является неразложившаяся часть атомного заряда (уран 235, плутоний 239). Энергия альфа-частиц для различных радиоактивных элементов лежит в пределах 2—8 мэв, причем каждым радиоактивным изотопом излучаются альфа-частицы, имеющие вполне определенную постоянную энергию. В частности, энергия альфа-частиц, излучаемых плутонием и ураном, приблизительно равна 5 мэв. При такой энергии альфа-частицы имеют начальную скорость около 15 000 км в секунду. По мере продвижения альфа-частиц в веществе их скорость уменьшается и в конце концов на некотором расстоянии становится равной скорости движения атомов и молекул среды. Это расстояние называется длиной пробега α-частицы в ве-

ществе. Замедленные альфа-частицы, присоединяя к себе электроны, превращаются в атомы гелия.

Причиной замедления альфа-частиц является столкновение их с атомами среды. При встрече с атомом альфа-частица ионизирует его и теряет при этом часть своей энергии. Сущность явления ионизации α-частицей, как и любой другой заряженной частицей, состоит в следующем. Если заряженная частица проходит на больших расстояниях от атома, то она не взаимодействует с ним, так как атом в целом является электрически нейтральным. Однако если заряженная частица войдет в оболочку атома, то между нею и электронами атома возникнут силы электрического взаимодействия. Под действием этих сил один или несколько электронов могут быть выброшены из атома. Таким образом, после множества столкновений вся энергия альфа-частиц расходуется на процесс ионизации. Альфа-частица обладает огромной ионизирующей способностью, последнюю принято характеризовать удельной ионизацией, то есть числом пар ионов, создаваемых частицей на пути в один миллиметр или сантиметр.

В воздухе на пути в 1 мм α-частица создает в среднем около 3000 пар ионов, общее же число пар ионов, создаваемых ею, лежит в пределах 100 000 $\div$ 200 000. Удельная ионизация в различных частях пробега α-частиц не одинакова. На рис. 10 показана кривая зависимости удельной ионизации от пути, пройденного α-частицей в воздухе, причем пройденный путь отсчитывается не от начала пробега, а от его конца. Из этого рисунка видно, что удельная ионизация в начале пробега сохраняет приблизительно постоянное

значение, но в конце пробега она возрастает более чем в два раза и составляет $6500 \frac{\text{пар ионов}}{\text{мм}}$.

Большая ионизирующая способность α-частиц приводит к тому, что длина их пробега даже в воз-

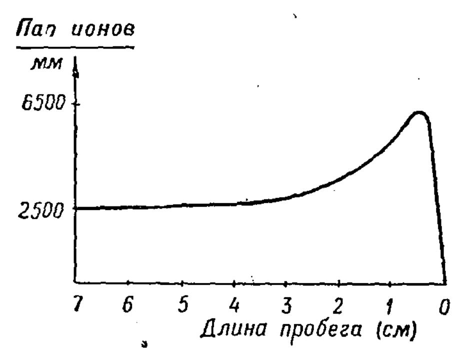


Рис. 10. Кривая удельной ионизации для альфа-частиц

духе не превышает нескольких сантиметров, причем число альфа-частиц в пучке почти на всем протяжении пробега остается постоянным.

Все альфа-частицы для одного и того же радиоактивного вещества имеют приблизительно одну и ту же длину пробега. Для плутония и урана длина пробега альфа-частиц в воздухе составляет 4 см, они полностью поглощаются одеждой человека, даже лист бумаги является для них непреодолимой преградой.

4. Свойства бета-лучей

Бета-распад — наиболее распространенный вид искусственной радиоактивности. Большинство из известных в настоящее время радиоактивных изо-

топов являются бета-активными. Основная часть радиоактивных продуктов атомного взрыва также является бета-активной.

При бета-распаде атома из его ядра вылетает одна β-частица. У отдельных атомов одного и того же радиоактивного вещества начальные энергии бета-частиц могут быть различными —

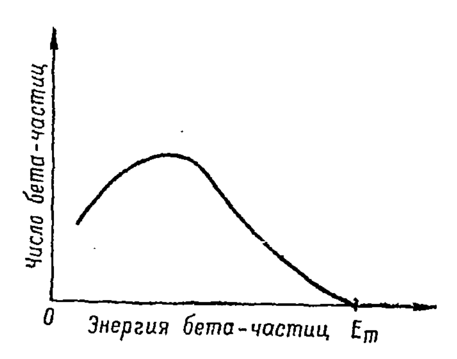


Рис. 11. Энергетический спектр бета-частиц

от 0 до некоторого максимального значения E_m, которое является характерным для каждого радиоактивного изотопа. Например, для изотопа стронция 89 максимальная энергия бета-частиц не превосходит 1,5 мэв, у изотопа кобальта 60 — 0,3 мэв и т. д. Максимальная энергия бета-частиц, излучаемых основной частью радиоактивных продуктов атомного взрыва, не превышает 3 мэв. В связи с различием в величине энергии отдельных бета-частиц их начальная скорость может лежать в пределах от нуля до скоростей, близких к скорости света. На рис. 11 показано характер-

ное распределение бета-частиц одного изотопа по энергии. Это распределение принято называть энергетическим спектром β-частиц. Долгое время оставалось неясным, почему ядра одного и того же изотопа испускают бета-частицы различной энергии, куда исчезает энергия, если бета-частица вылетает из ядра с меньшей энергией, чем E_m. Должное объяснение этой особенности бета-распада было получено после того, как было высказано предположение, что одновременно с β-частицей из ядра вылетает еще одна частица, названная нейтрино. Сумма энергий нейтрино и β-частицы как раз равна E_m. Нейтрино не имеет электрического заряда, ее масса значительно меньше массы электрона.

Поток бета-частиц, проходя через какую-либо среду, взаимодействует с атомами вещества среды. Наиболее характерным результатом взаимодействия бета-частиц со средой, так же как и альфа-частиц, является ионизация атомов. Выбитый из атома β-частицей электрон сам может ионизировать атомы, встретившиеся ему на пути. Ионизация этими электронами, как уже указывалось, называется вторичной ионизацией. В результате первичной и вторичной ионизации бета-частица на своем пути может создать тысячи ионов. Кроме ионизации, а также возбуждения атомов, бета-частица может расходовать свою энергию на так называемое тормозное излучение.

При прохождении бета-частицы вблизи ядра атома под воздействием электрических сил она тормозится. Из курса физики известно, что всякое замедление движения электрического заряда должно сопровождаться излучением электромагнитной энергии. Эту энергию бета-частица испускает в виде кванта рентгеновского излучения.

Величина потерь энергии на тормозное излучение обратно пропорциональна квадрату массы заряженной частицы, поэтому для α-частиц эти потери энергии составляют ничтожно малую величину по сравнению с бета-частицами той же энергии. При прохождении быстрых бета-частиц через такие тяжелые вещества, как свинец, их потери энергии на тормозное излучение могут стать соизмеримыми с потерями энергии на ионизацию. Кстати заметим, что принцип действия рентгеновских аппаратов, широко используемых в медицине, основан на торможении быстрых электронов при их столкновении с поверхностью тяжелых веществ (анод рентгеновской трубки).

По мере прохождения бета-частицы вглубь вещества она постепенно теряет свою энергию, и в конце концов на некотором расстоянии ее энер-

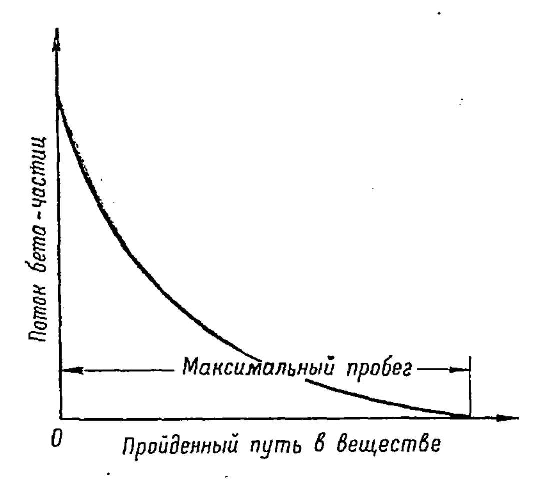


Рис. 12. Ослабление потока бета-частиц в веществе

гия уменьшается до уровня средней энергии частиц, составляющих среду. Чем больше начальная энергия бета-частицы, тем больше ее пробег в данном веществе. Так как энергия бета-частиц различна, то в отличие от альфа-частиц они имеют разнообразные пробеги. Поэтому ослабление пучка бета-частиц, испускаемых данным радиоактивным изотопом, происходит не сразу, а постепенно. На рис. 12 показана кривая, характеризующая ослабление потока бета-частиц по мере их прохождения через вещество. Расстояние, на котором бета-частицы нацело поглощаются слоем вещества, называется максимальным пробегом β-частиц.

На рис. 13 показана максимальная длина пробега потока бета-частиц в различных материалах для трех максимальных энергий: 0,5 мэв, 1 мэв, 2 мэв. Из этого рисунка следует, что, во-первых, при одной и той же максимальной энергии длина пробега частиц уменьшается с увеличением плотности материала и, во-вто-

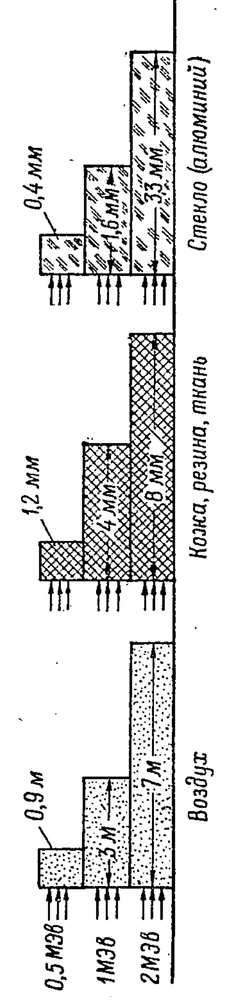


Рис. 13. Пробег бета-частиц в различных материалах

рых, для одного и того же материала с увеличением энергии возрастает длина пробега. Из этого же рисунка можно сделать вывод, что бета-излучение полностью поглощается подошвой сапог, оконными или автомобильными стеклами и любыми металлическими экранами толщиной в несколько миллиметров.

Бета-частицы обладают значительно меньшей ионизирующей способностью, чем α-частицы. Это объясняется тем, что бета-частицы, имеющие ничтожно малую массу по сравнению с альфа-частицами, при одной и той же энергии обладают значительно большими скоростями. Поэтому бета-частицы пролетают через атом слишком быстро, часто не успевая вырвать электрон, который мог бы быть вырван относительно медленно двигающейся альфа-частицей. Кроме того, величина электрического заряда альфа-частицы в два раза больше, чем у бета-частицы, в результате чего на одних и тех же расстояниях сила электрического взаимодействия вырываемого электрона и альфа-частицы в два раза больше, чем у бета-частицы.

Общее число пар ионов, образованных бета-частицей, равно величине ее энергии, поделенной на среднюю работу ионизации в данном веществе. Как уже указывалось, средняя работа ионизации, т. е. энергия, затрачиваемая на образование одной пары ионов в воздухе, равна 33 эв. Поэтому, если бета-частица имеет начальную энергию 1 мэв, то общее число пар ионов, образованных ею в воздухе, равно $\frac{1 \cdot 10^6}{33} \approx 30\,000$. Поделив общее число пар ионов на длину пробега бета-частицы в воздухе, получим величину средней удельной ионизации. В нашем примере

длина пробега равна 3000 мм, поэтому средняя удельная ионизация равна $10 \frac{\text{пар ионов}}{\text{мм}}$, в то время как для α-частиц она составляла несколько тысяч пар ионов на том же отрезке пути. Ионизирующая способность бета-частиц пропорциональна плотности вещества, в которой они производят ионизацию. Например, в алюминии (плотность 2,7 г/см³) удельная ионизация в 2000 раз больше, чем в воздухе (плотность 0,00127 г/см³). Удельная ионизация бета-частицы на первом участке пробега сохраняет примерно постоянное значение, затем резко возрастает, как и у альфа-частиц.

5. Свойства гамма-лучей

Ранее уже отмечалось, что гамма-лучи, как и любое другое электромагнитное излучение, существуют в виде отдельных порций — квантов, обладающих вполне определенной энергией. Связь между длиной волны электромагнитного излучения и энергией кванта определяется простой формулой:

$$E = \frac{1{,}234 \cdot 10^{-4}}{\lambda},$$

где E — энергия кванта в электронвольтах,

λ — длина волны излучения в сантиметрах.

Чем больше энергия кванта, тем меньше длина волны излучения, и наоборот.

В табл. 1 приведены величины энергий квантов, соответствующие различным видам электромагнитных излучений.

Таблица 1

Энергии квантов различных видов электромагнитных излучений

Вид излучения	Длина волны, сантиметры	Энергия кванта, эв	Вид излучения	Длина волны, сантиметры	Энергия кванта, эв
Гамма-лучи	От $3\cdot10^{-9}$ и менее	От $4\cdot10^{4}$ и более	Видимые лучи	$7{,}5 10^{-5} \div 4\cdot10^{-5}$	$1{,}65 \div 3$
Рентгеновские лучи, испускаемые оболочкой атомов	10^{-6}—10^{-9}	$100 \div 10^{5}$	Инфракрасные лучи	$10^{-2} \div 7{,}5\cdot10^{-5}$	$0{,}1 \div 1{,}65$
Ультрафиолетовые лучи	$4\cdot10^{-5}$—10^{-6}	$3 \div 100$	Радиоволны	более 10^{-2}	0,1 и менее

Гамма-лучи принципиально не отличаются от коротковолнового рентгеновского излучения. Обычно под термином рентгеновские лучи подразумеваются излучения, испускаемые электронной оболочкой атома и быстрыми электронами при их торможении, а γ-лучами называют излучения, испускаемые ядрами атомов.

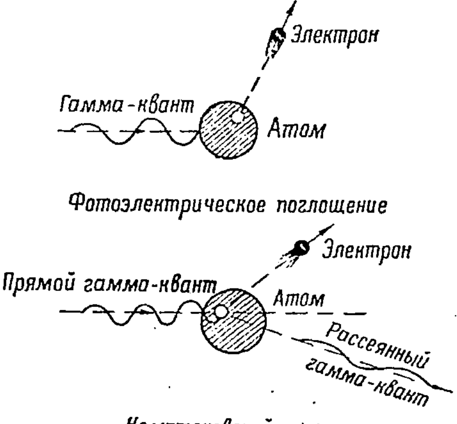
Гамма-лучи — *одно из наиболее проникающих* излучений. С увеличением энергии кванта проникающая способность этих лучей возрастает. Энергия гамма-квантов, испускаемых различными радиоактивными изотопами, лежит в пределах от сотых долей до нескольких миллионов электрон-вольт, причем каждым радиоактивным изотопом излучаются гамма-кванты вполне определенных энергий. Например, радиоактивный алюминий 27 при распаде каждого атома излучает один гамма-квант с энергией 1,8 мэв, радиоактивный натрий 24 — два гамма-кванта с энергиями 1,36 и 2,76 мэв и т. д.

Отсутствие электрического заряда у гамма-квантов приводит к тому, что характер их взаимодействия с веществом среды, в которой они распространяются, совершенно иной, чем у альфа- и бета-частиц, имеющих электрические заряды. Известны три вида взаимодействия гамма-квантов с атомами среды: фотоэлектрическое поглощение, комптоновский эффект и образование пар.

При фотоэлектрическом поглощении (рис. 14) происходит взаимодействие гамма-кванта с электронами атома, в результате чего гамма-квант целиком поглощается атомом. Небольшая часть энергии гамма-кванта идет на преодоление энергии связи электрона в атоме, а остальная часть — на сообщение электрону скорости. Вырванные электроны двигаются преимущественно по на-

правлениям, перпендикулярным направлению распространения гамма-лучей.

При комптоновском эффекте (рис. 14) гамма-квант, взаимодействуя с электроном атома, пере-



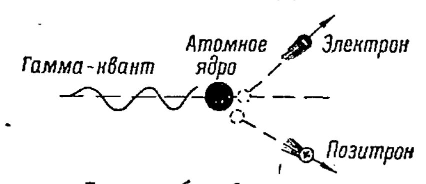


Рис. 14. Виды взаимодействия гамма-квантов с веществом

дает ему часть своей энергии. Вместо первичного гамма-кванта появляется гамма-квант с меньшей энергией (то есть с большей длиной волны) и вырванный из атома электрон, получивший часть энергии гамма-кванта. Рассеянный гамма-квант, то есть квант, передавший часть своей энергии

электрону, движется под некоторым случайным углом к своему первоначальному направлению, однако этот угол в среднем тем меньше, чем больше энергия первичного кванта. Поток рассеянных гамма-квантов образует так называемое рассеянное излучение, которое в отличие от пря-

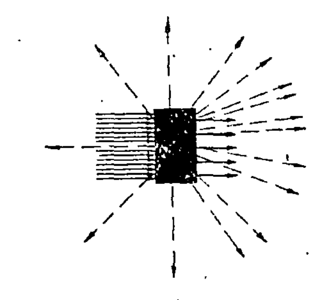


Рис. 15. Характер направленности распространения рассеянного гамма-излучения

мого пучка гамма-квантов не имеет резко выраженной направленности распространения (рис. 15).

Рассеяние гамма-квантов, как правило, происходит многократно и заканчивается в конце концов фотоэлектрическим поглощением.

Наконец, при энергиях более 1,02 мэв гамма-кванты в результате взаимодействия с ядром атома могут превращаться в пару частиц — позитрон-электрон. Однако этот процесс становится преобладающим лишь при очень больших энергиях гамма-квантов и в материалах с большим атомным номером *Z*.

В табл. 2 приведены значения энергии гамма-квантов, при которых преобладает один из трех процессов взаимодействия гамма-лучей с различными веществами.

Таблица 2

Преобладающие процессы взаимодействия гамма-квантов в различных веществах в зависимости от их энергии

Вещество	Фотоэлектрическое поглощение	Комптоновское рассеяние	Процесс образования пар
Воздух	до 0,05 мэв	до 20 мэв	свыше 20 мэв
Медь	до 0,15 мэв	до 10 мэв	свыше 10 мэв
Свинец	до 0,5 мэв	до 5 мэв	свыше 5 мэв

Фотоэлектрическое поглощение характерно для гамма-квантов малой энергии (сотые доли миллиона электронвольт), за исключением веществ с большим атомным номером Z, где оно может преобладать и при значительных энергиях гамма-квантов. (Из табл. 2 видно, что в свинце, имеющем $Z = 82$, этот процесс преобладает до $E_\gamma = 0{,}5$ мэв.)

В легких средах (воздух, вода, грунт, кожа, стекло, пластмассы, алюминий и т. д.), в состав которых входят элементы с небольшим атомным номером Z, в диапазоне энергии гамма-квантов от десятых долей мегаэлектронвольта до 10 мэв и более преобладающим типом взаимодействия гамма-квантов с атомами вещества является комптоновский эффект.

По мере прохождения гамма-лучей через вещество их интенсивность постепенно ослабевает.

Интенсивностью гамма-излучения называется количество энергии, переносимой гамма-квантами через один квадратный сантиметр облучаемой поверхности за одну секунду. Если поток гамма-лучей состоит из гамма-квантов одной и той же энергии, то интенсивность излучения равна

$$E = I \cdot E_{\gamma},$$

где I — секундный поток гамма-квантов, то есть число гамма-квантов, проходящих через один квадратный сантиметр поверхности в течение одной секунды;

E_{γ} — энергия одного гамма-кванта.

На рис. 16 показано ослабление интенсивности параллельного пучка гамма-лучей в зависимости от толщины слоя вещества. Ослабление интенсивности гамма-лучей происходит по экспоненциальному закону.

Если через E_0 обозначить интенсивность излучения при входе лучей в облучаемую среду,

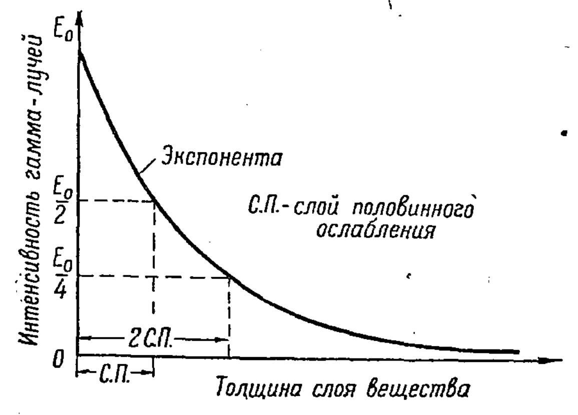


Рис. 16. Ослабление интенсивности гамма-лучей

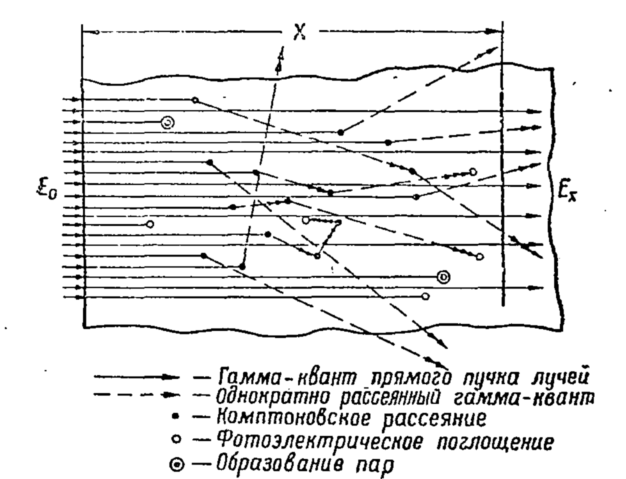


Рис. 17. Схематическая картина ослабления гамма-лучей в веществе

(рис. 17), то интенсивность E_x после прохождения слоя среды толщиной x сантиметров равна

$$E_x = E_0 \cdot e^{-\mu x}, \quad (4)$$

где μ — линейный коэффициент ослабления гамма-лучей для данной среды.

Ослабление интенсивности гамма-лучей обусловлено всеми тремя видами взаимодействия квантов со средой, поэтому коэффициент μ можно представить в виде суммы трех коэффициентов:

$$\mu = \tau_a + \sigma + \tau_n,$$

где τ_a — коэффициент, учитывающий ослабление гамма-лучей за счет фотоэлектрического поглощения;

τ_n — коэффициент ослабления за счет процесса образования пар;

σ — коэффициент, учитывающий ослабление за счет комптоновского эффекта.

По физическому смыслу коэффициенты τ_a, σ, τ_n представляют собой отношение числа гамма-квантов, претерпевших соответствующий вид взаимодействия, к общему числу гамма-квантов, прошедших через 1 см^3 данной среды[1]. Иными словами говоря, коэффициенты τ_a, σ, τ_n численно равны вероятности соответствующего процесса взаимодействия гамма-квантов с веществом.

Коэффициент σ в свою очередь может быть представлен в виде суммы двух коэффициентов

$$\sigma = \sigma_a + \sigma_s,$$

где σ_a — коэффициент, учитывающий поглощение энергии излучения при комптоновском эффекте,

σ_s — коэффициент, учитывающий ослабление излучения за счет рассеяния гамма-квантов.

Из рис. 17, где схематически изображена картина ослабления гамма-лучей, видно, что часть рассеянных гамма-квантов может не выходить за пределы пучка излучения, особенно если он широкий. Поэтому действительное ослабление интенсивности будет происходить более медленно, чем это дается формулой (4).

Коэффициент ослабления μ сложным образом зависит от энергии гамма-квантов и свойств среды. В табл. 3 приведены значения коэффициента μ в зависимости от энергии квантов для различных сред.

---

[1] Строго говоря, такое истолкование линейных коэффициентов ослабления τ_a, σ, τ_n справедливо лишь при условии, что они значительно меньше $1 \frac{1}{\text{см}}$, что, например, всегда имеет место для воздуха (см. таблицу 3).

Таблица 3

Линейные коэффициенты ослабления гамма-лучей для воздуха, воды, свинца

Энергия гамма-квантов в мэв	Воздух					Вода					Свинец				
	$\tau_a \frac{1}{см}$	$\sigma_a \frac{1}{см}$	$\sigma_s \frac{1}{см}$	$\tau_n \frac{1}{см}$	$\mu \frac{1}{см}$	$\tau_a \frac{1}{см}$	$\sigma_a \frac{1}{см}$	$\sigma_s \frac{1}{см}$	$\tau_n \frac{1}{см}$	$\mu \frac{1}{см}$	$\tau_a \frac{1}{см}$	$\sigma_a \frac{1}{см}$	$\sigma_s \frac{1}{см}$	$\tau_n \frac{1}{см}$	$\mu \frac{1}{см}$
0,1	$0,06 \cdot 10^{-4}$	$0,25 \cdot 10^{-4}$	$1,67 \cdot 10^{-4}$	0	$1,98 \cdot 10^{-4}$	0,008	0,021	0,143	0	0,172	58,6	0,17	1,13	0	59,9
0,25	0	$0,37 \cdot 10^{-4}$	$1,09 \cdot 10^{-4}$	0	$1,46 \cdot 10^{-4}$	0	0,032	0,094	0	0,126	5,3	0,25	0,75	0	6,3
0,5	0	$0,37 \cdot 10^{-4}$	$0,74 \cdot 10^{-4}$	0	$1,11 \cdot 10^{-4}$	0	0,033	0,063	0	0,096	0,91	0,26	0,50	0	1,67
1	0	$0,36 \cdot 10^{-4}$	$0,45 \cdot 10^{-4}$	0	$0,81 \cdot 10^{-4}$	0	0,031	0,039	0	0,070	0,20	0,24	0,31	0	0,75

Довольно часто ослабление интенсивности гамма-лучей характеризуют не коэффициентом μ, а величиной слоя половинного ослабления — С. П. Слой половинного ослабления — это слой вещества, при прохождении которого интенсивность гамма-лучей уменьшается в два раза (рис. 16). Между коэффициентом μ и слоем половинного ослабления для данного вещества существует простая связь

$$\text{С. П.} = \frac{0{,}693}{\mu}.$$

Слой половинного ослабления зависит, так же как и коэффициент μ, от энергии гамма-квантов и свойств вещества (плотность среды, атомный номер Z). Для сред, состоящих из веществ с близкими атомными номерами, слой половинного ослабления обратно пропорционален плотности среды.

На рис. 18 показаны слои половинного ослабления гамма-лучей в раз-

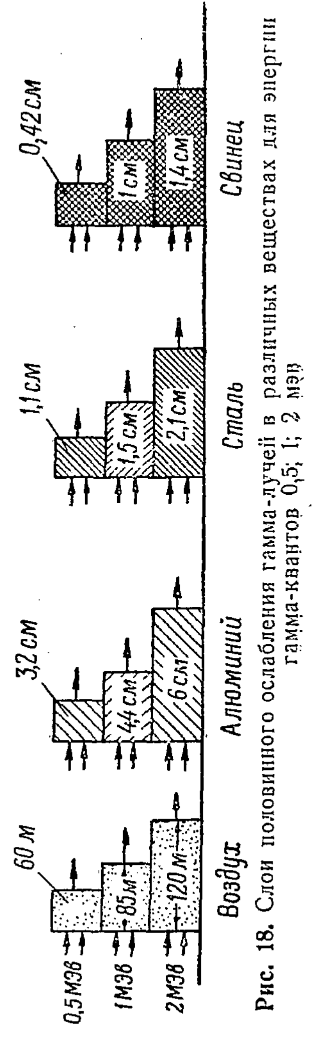


Рис. 18. Слои половинного ослабления гамма-лучей в различных веществах для энергии гамма-квантов 0,5; 1; 2 мэв

личных веществах для энергии гамма-квантов 0,5; 1; 2 мэв.

Из этого рисунка видно, что проникающая способность гамма-лучей неизмеримо больше, чем бета- и особенно альфа-лучей. Гамма-лучи могут пройти в воздухе несколько сот метров без значительного ослабления, в то время как альфа-частицы полностью поглощаются слоем воздуха в несколько сантиметров, а бета-частицы — несколько метров. Слой алюминия толщиной 9 см ослабляет гамма-лучи (энергия гамма-кванта 1 мэв) всего лишь в 4 раза, бета-частицы той же энергии полностью поглощаются слоем алюминия толщиной 2 мм, а альфа-частицы — алюминиевой фольгой толщиной в несколько сотых долей миллиметра.

Для узкого параллельного пучка гамма-лучей интенсивность излучения после прохождения им слоя толщиной X см равна

$$E = E_0\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{x}{\text{с. п.}}}.$$

Например, если слой половинного ослабления равен 1 см, то при прохождении излучением слоя толщиной 10 см ослабление интенсивности равно

$$\frac{E_0}{E} = \frac{1}{\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{x}{\text{с. п.}}}} = 2^{\frac{x}{\text{с. п.}}} \approx 1000 \text{ раз.}$$

Интенсивность расходящегося пучка гамма-лучей уменьшается не только в результате ослабления излучения средой, но и за счет увеличения расстояния от источника.

На рис. 19 изображен источник гамма-излучения, испускающий гамма-лучи во все стороны равномерно. Пусть этот источник испускает N квантов в секунду. Тогда, если среда не ослабляет

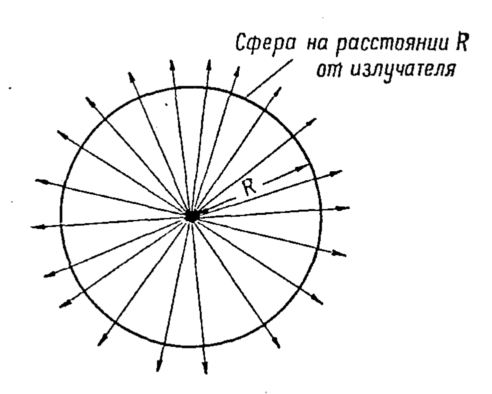


Рис. 19. Точечный излучатель, испускающий гамма-кванты во все стороны равномерно

излучение, секундный поток гамма-квантов через один квадратный сантиметр на расстоянии R от источника излучения равен

$$I = \frac{N}{S},$$

где S — площадь сферы, радиус которой равен R см.

Поскольку $S = 4\pi R^2$, то

$$I = \frac{N}{4\pi R^2}.$$

Если испускаемые источником гамма-кванты

имеют одну и ту же энергию, то интенсивность E на расстоянии R равна

$$E = \frac{N}{4\pi R^2} \cdot E_\gamma,$$

то есть интенсивность излучения убывает обратно пропорционально квадрату расстояния.

С учетом ослабления излучения средой интенсивность равна

$$E = \frac{N}{4\pi R^2} E_\gamma \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{R}{\text{с. п.}}}.$$

Последняя формула получена в предположении, что все рассеянные гамма-кванты выходят за пределы пучка прямого излучения; кроме того, эта формула справедлива лишь для источников, размеры которых значительно меньше расстояния R. Такие источники получили название точечных излучателей.

Процесс ионизации атомов среды гамма-квантами существенно отличается от ионизации, производимой альфа-и бета-частицами. Альфа- и бета-частицы в основном непосредственно сами ионизируют атомы; ионизация, обусловленная вторичными электронами, у этих излучений мала. Ионизация же среды при прохождении через нее гамма-лучей производится главным образом вторичными электронами, которые возникают в результате взаимодействия гамма-квантов с атомами вещества. Ионизирующая способность гамма-квантов в сотни раз меньше, чем у бета-частиц, и в тысячи раз меньше, чем у альфа-частиц. Удельная ионизация гамма-квантов в воздухе составляет несколько пар ионов на пути в один сантиметр.

В табл. 4 приведено сопоставление свойств альфа-, бета-и гамма-излучений.

Таблица 4

Сводная характеристика свойств радиоактивных излучений

Вид излучения	Природа излучения	Средняя удельная ионизация в воздухе на пути в 1 см	Проникающая способность в воздухе
α-лучи	Поток ядер атомов гелия	Несколько десятков тысяч пар ионов	Длина пробега несколько сантиметров
β-лучи	Поток позитронов и электронов	Около 100 пар ионов	Длина пробега несколько метров
γ-лучи	Электромагнитное излучение	Несколько пар ионов	Слой половинного ослабления (при $E_\gamma = 1$ мэв) 85 м

6. Единица измерения ионизирующего действия радиоактивных излучений

Вредное биологическое действие радиоактивных излучений обусловлено их способностью ионизировать атомы и молекулы, входящие в состав клетки живой ткани. В результате ионизации в ряде случаев происходит распад и образование новых молекул, что приводит к изменению свойств жизненно важных частей клетки. Важнейшая цель дозиметрических измерений — предупредить поражение людей от вредного воздействия радиоактивных излучений, поэтому выбор единицы ионизирующего действия излучений

тесно связан с оценкой их вредного биологического действия.

Степень ионизации любого вещества характеризуется числом пар ионов, образованных радиоактивным излучением в одном кубическом сантиметре, или грамме, этого вещества. На образование одной пары ионов в каждом веществе затрачивается вполне определенная энергия, которая, как нам уже известно, называется средней работой ионизации. Поэтому по величине произведенной ионизации можно судить о величине поглощенной энергии и наоборот. Число пар ионов, образованных в одном кубическом сантиметре вещества, равно $\frac{\text{энергия, поглощенная в см}^3}{\text{средняя работа ионизации}}$. Например, если в одном кубическом сантиметре воздуха поглощенная энергия радиоактивных лучей равна $100 \cdot 10^6$ эв, то образуется $\frac{100 \cdot 10^6 \text{ эв}}{33 \text{ эв}} \approx$ $\approx 3 \cdot 10^6$ пар ионов в см^3.

Энергия радиоактивных излучений, поглощенная в одном кубическом сантиметре вещества, называется дозой излучения. Чем больше доза, тем больше степень ионизации вещества. Для гамма-лучей, имеющих постоянную интенсивность, доза излучения *Д* равна

$$Д = \mu_a \cdot E \cdot t, \qquad (5)$$

где t — время облучения;
E — интенсивность излучения;
μ_a — линейный коэффициент поглощения гамма-лучей в веществе, подвергающемся облучению.

Поглощение энергии гамма-лучей, то есть переход ее в кинетическую энергию быстрых вторичных электронов, ионизирующих среду, происхо-

дит за счет фотоэлектрического поглощения, поглощения энергии при комптоновском эффекте и в процессе образования пар. Поэтому коэффициент μ_a равен

$$\mu_a = \tau_a + \sigma_a + \tau_n.$$

Заме́тим, что величина коэффициента μ_a меньше коэффициента μ на величину коэффициента комптоновского рассеяния σ_s, так как рассеянные гамма-кванты уносят энергию из пучка лучей без ее поглощения средой.

Из формулы (5) можно заключить, что величина дозы возрастает прямо пропорционально интенсивности излучения и времени облучения. Кроме того, через коэффициент μ_a она зависит от величины энергии гамма-кванта, плотности облучаемого вещества и его атомного номера Z.

Поскольку величина дозы зависит от свойств среды, то естественно сравнивать ионизирующее действие излучений можно лишь по величине дозы, создаваемой ими в одной и той же среде. В качестве такой среды выбран воздух, и сама единица дозы определена по степени ионизации воздуха. За единицу дозы выбран рентген.

Рентген — это такая доза излучения, при которой в одном кубическом сантиметре сухого воздуха при нормальных условиях[1] образованные ионы одного знака имеют суммарный заряд, равный одной электростатической единице количества электричества (CGSE).

Заряд электрона равен $4{,}8 \cdot 10^{-10}$ CGSE, поэтому если предположить, что каждый из ионов

---

[1] *Температура* 0° С *и давление* 760 *мм ртутного столба.*

имеет заряд одного электрона, то число пар ионов, образующихся при дозе в один рентген в 1 см³ воздуха, равно $\frac{1}{4,8 \cdot 10^{-10}} = 2,08 \cdot 10^9$, то есть примерно два миллиарда.

Отсюда следует второе определение рентгена: рентген — это такая доза излучения, при которой в одном кубическом сантиметре воздуха при нормальных условиях образуется приблизительно два миллиарда пар ионов, каждый из которых имеет заряд, равный заряду электрона.

Нетрудно найти, какой поглощенной энергии соответствует доза в один рентген. Энергия, затрачиваемая на образование одной пары ионов в воздухе, равна 33 эв; при дозе в 1 рентген образуется 2 миллиарда пар ионов, поэтому поглощенная энергия излучения в 1 см³ равна: 2 миллиарда пар ионов $\times$ 33 эв = 66 миллиардов электронвольт ($66 \cdot 10^3$ мэв).

Определение единицы дозы по степени ионизации воздуха, выраженной в рентгенах, объясняется, во-первых, тем, что степень ионизации воздуха можно наиболее просто измерить и, во-вторых, энергии, поглощенные в 1 см³ живой ткани и в 1 см³ воздуха, пропорциональны друг другу в широком диапазоне энергии гамма-квантов. Множитель пропорциональности равен отношению плотностей тканей и воздуха. Последнее обстоятельство позволяет судить о степени ионизации живых тканей по степени ионизации воздуха, не интересуясь энергией гамма-квантов.

Отношение плотности ткани к плотности воздуха равно 770, поэтому если в воздухе будет измерена доза в 1 рентген, то ткань живого организма получит дозу в 770 рентген. Однако такой пересчет обычно не делают, а о степени иони-

зации ткани непосредственно судят по величине дозы, измеренной в воздухе.

В выражении (5) доза измеряется в единицах энергии на 1 см^3. Один рентген соответствует поглощению в 1 см^3 воздуха $66 \cdot 10^3$ мэв энергии радиоактивных излучений, поэтому если правую часть формулы (5) поделить на эту величину, то можно получить выражение для дозы в рентгенах:

$$Д = \frac{\mu_a E \cdot t}{66 \cdot 10^3} = 0{,}153 \cdot 10^{-4} \cdot \mu_a E \cdot t,$$

но

$$E = I \cdot E_\gamma,$$

поэтому

$$Д = 0{,}153 \cdot 10^{-4} \cdot \mu_a \cdot E_\gamma \cdot I \cdot t \text{ (рентген)}.$$

В последней формуле энергия гамма-кванта E_γ должна выражаться в мегаэлектронвольтах. Кстати, в воздухе процессом образования пар можно пренебречь, то есть коэффициент $\tau_n \approx 0$, и поэтому

$$\mu_a = \tau_a + \sigma_a.$$

Доза, накапливаемая в течение единицы времени, называется мощностью дозы. Если мощность дозы P постоянна, то

$$Д = P \cdot t$$

или

$$P = \frac{Д}{t} = 0{,}153 \cdot 10^{-4} \cdot \mu_a \cdot E_\gamma \cdot I \text{ рентген/сек}.$$

Обычно принято мощность дозы измерять в рентгенах в час; так как 1 час = 3600 сек., то

$$P = 0{,}153 \cdot 10^{-4} \cdot 3600 \cdot \mu_a E_\gamma \cdot I =$$
$$= 0{,}0525 \cdot \mu_a E_\gamma I \text{ рентген/час,}$$

где I — поток γ-квантов через 1 см^2 в 1 сек.

Подсчитаем мощность дозы, создаваемую секундным потоком гамма-квантов $I = 1000 \frac{\text{квант}}{\text{сек. см}^2}$ с энергией кванта $E_\gamma = 1$ мэв. Из таблицы 3 для воздуха находим $\mu_a = 0{,}36 \cdot 10^{-4}$ 1/см.

$$P = 0{,}0525 \cdot \mu_a \cdot E_\gamma \cdot I = 0{,}0525 \cdot 0{,}36 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 1000 =$$
$$= 18 \cdot 10^{-4} \text{ рентген/час.}$$

Ионизирующее действие бета- и альфа-лучей также принято измерять в рентгенах. Однако следует иметь в виду, что одинаковой ионизации под действием гамма-, бета-, альфа-лучей соответствует различное биологическое действие. Иначе говоря, доза в один рентген от гамма-лучей по биологическому действию неэквивалентна дозе в один рентген от бета- и альфа-лучей, что объясняется различной проникающей и ионизирующей способностью отдельных видов радиоактивных излучений.

О поражающем действии радиоактивных излучений мы более подробно расскажем в главе IV. Сейчас же для того, чтобы представить себе рентген как единицу дозы, приведем несколько примеров.

На ручные часы со светящимся в темноте циферблатом наносят светящуюся смесь, состоящую

из сернистого цинка и незначительного количества радия (около одной миллионной доли грамма). Радий излучает гамма-лучи, которые, проходя через заднюю стенку футляра, воздействуют на руку с дозой около 0,1 рентгена в сутки.

Все мы непрерывно подвергаемся воздействию космического излучения и гамма-излучения, происходящего от естественных загрязнений почвы, воздуха и воды радиоактивными веществами. Доза, создаваемая этими излучениями, не превышает двух десятитысячных рентгена в день. У каждого из нас один или несколько раз в году производится врачами рентгеноскопия (фотографирование) грудной клетки; доза, создаваемая при этом рентгеновскими лучами, составляет около 0,05 рентгена за один снимок.

Эти три примера иллюстрируют величины доз, совершенно безопасных для здоровья человека.

7. Гамма-постоянная точечного источника гамма-излучения

Величину мощности дозы от гамма-излучения, испускаемого точечным излучателем определенной активности, легко определить, если известна его гамма-постоянная.

Гамма-постоянная — это величина дозы, создаваемая точечным излучателем активностью в 1 кюри за один час на расстоянии 1 м.

Гамма-постоянная зависит от величины энергии и числа гамма-квантов, испускаемых радиоактивным изотопом при распаде одного атома.

В табл. 5 даны величины гамма-постоянных некоторых радиоактивных изотопов.

Таблица 5

Гамма-постоянные некоторых радиоактивных изотопов

Название изотопа	Химический символ	Период полураспада *T*	Число гамма-квантов, приходящихся на один распад	Энергия гамма-квантов *мэв*	Гамма-постоянная в рентген/час i_γ
Кобальт 60	Co^{60}	5,0 лет	2	1,17 1,33	1,35
Натрий 24	Na^{24}	15,0 часов	2	1,37 2,76	1,91
Железо 59	Fe^{59}	45,5 дня	1	1,3 1,10	0,655
Цирконий 95	Zr^{95}	65,3 дня	1,88	0,73 0,23	0,54
Церий 141	Ce^{141}	28 дней	0,54	0,15	0,038
Иод 131	J^{131}	8 дней	1	0,36	0,245

Зная величину гамма-постоянной и активность точечного источника, нетрудно найти мощность дозы, создаваемую излучением на расстоянии R от источника:

$$P = \frac{i_\gamma \cdot Q}{R^2} \text{ рентген/час,} \qquad (6)$$

где i_γ — гамма-постоянная изотопа,
R — расстояние от источника в метрах,
Q — активность источника в кюри.

Пример. Определить мощность дозы гамма-излучения от точечного излучателя Co^{60} активностью $Q = 3$ кюри на расстоянии $R = 10$ м.

Из табл. 5 находим для изотопа Co^{60} значение $i_\gamma = 1,35$ рентген в час.

$$P = \frac{1,35 \cdot 3}{100} = 0,0405 \text{ рентген/час.}$$

Гамма-постоянная 1 г радия при фильтре 1 мм из платины, который поглощает все β-лучи, равна 0,84 рентген/час. Следует отметить, что радий находится вместе со своими продуктами распада (радон, Ra A, Ra B и др.), которые также радиоактивны, поэтому ионизирующее действие обусловливается не только гамма-лучами радия, но и излучением его продуктов распада.

Иногда для характеристики ионизирующего действия гамма-излучения источника пользуются еще одной величиной — грамм-эквивалентом радия. Грамм-эквивалент радия — это такое количество радиоактивного вещества, которое при одинаковых геометрических условиях создает ту же дозу, что и один грамм радия в равновесии со своими продуктами распада. Если активность источника выражена в грамм-эквивалентах радия Г, мощность дозы от такого источника на расстоянии R метров равна

$$P = \frac{0{,}84 \cdot \Gamma}{R^2} \text{ рентген/час.}$$

—— o ——

III. МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Радиоактивные излучения непосредственно не ощущаются нашими органами чувств, однако это совсем не означает, что их невозможно обнаружить.

Всем известно, что радиоволны невидимы и неслышимы, но достижения современной науки и техники позволяют нам с их помощью видеть и слышать на дальние расстояния (радио, телевидение).

Инфракрасные лучи, воздействуя на глаз, не оставляют у нас зрительного впечатления, но современные приборы, основанные на использовании этих лучей, позволяют видеть в дымке и тумане значительно дальше, чем невооруженным глазом.

Каждому известно, что невидимые рентгеновские лучи являются мощным средством современной медицины, с помощью этих лучей врачи видят и фотографируют внутренние органы человеческого организма.

Радиоволны, инфракрасные, рентгеновские, радиоактивные и другие невидимые излучения обнаруживаются благодаря тому или иному виду взаимодействия их с окружающей средой. При-

боры же выполняют роль посредников между человеком и средой, с помощью которых эти процессы взаимодействия становятся не только видимыми и слышимыми, но и могут измеряться количественно.

Все методы обнаружения и измерения радиоактивных излучений основаны на способности этих излучений ионизировать вещество среды, в которой они распространяются. Ионизация в свою очередь может явиться причиной целого ряда физических или химических изменений в веществе среды. Подобные изменения во многих случаях могут быть сравнительно просто зафиксированы. К таким изменениям среды под действием радиоактивных излучений относятся: сгущение (конденсация) водяных паров вдоль пути ионизирующей частицы, засвечивание фотопленок, изменение окраски химических растворов, свечение некоторых составов, возникновение ионного тока в газах и т. д.

1. Методы регистрации путей отдельных частиц

К этим методам относятся метод камеры Вильсона и метод толстослойных фотопластинок.

Камера Вильсона является одним из первых приборов, с помощью которого в физических лабораториях научились воочию наблюдать и фотографировать пути отдельных ионизирующих частиц.

Представим себе, что альфа-частица движется в газе. Когда эта частица близко подходит к атому газа, она ионизирует его, при этом образуются ион и электрон. О пути частицы можно судить по положению этих ионизированных атомов. Однако это непосредственно сделать нельзя, так как даже

с помощью самых мощных микроскопов мы не можем увидеть отдельные атомы.

Физиком Вильсоном был предложен остроумный метод, позволяющий обнаружить ионы среди нейтральных атомов газа.

Известно, что в воздухе практически всегда находятся водяные пары. Чем выше температура воздуха, тем большее количество водяных паров он может содержать. С понижением температуры избыточные водяные пары превращаются в видимые капли воды. Облака, туман, роса — это мельчайшие капельки воды, возникшие в результате охлаждения ее паров. Однако пары воды при их охлаждении сгущаются в капельки воды лишь в том случае, если в воздухе имеются пылинки, частицы дыма, вокруг которых и происходит образование капель. В отсутствие таких частиц капельки воды не возникают и пары воды остаются прозрачными, невидимыми.

Каждому приходилось наблюдать, как при полете самолета в ясный день на большой высоте за ним остается белая длинная полоса. Это объясняется тем, что выхлопные газы двигателя самолета содержат большое количество частиц, являющихся центрами сгущения охлажденных водяных паров в капельки воды, которые и образуют туманную полосу вдоль пути самолета.

Наиболее хорошо водяные пары сгущаются в капельки воды на электрически заряженных частицах — ионах. Это обстоятельство было положено Вильсоном в основу устройства своего прибора.

Камера Вильсона представляет короткую металлическую трубу (цилиндр) (рис. 20), в которой может двигаться поршень. Верхнее основание камеры сделано из стекла. Пространство

внутри камеры заполняется воздухом, насыщенным водяным паром. Через боковое окошко в камеру направляется поток альфа- или бета-частиц, создающих на своем пути в газе большое количество ионов. Если поршень резко опустить вниз, то воздух, находящийся в камере, быстро расши-

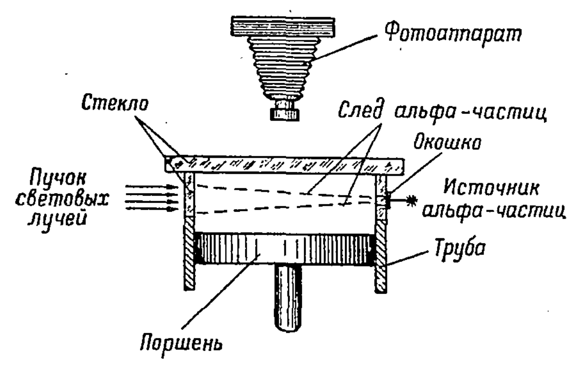


Рис. 20. Схема устройства камеры Вильсона

рится, вследствие чего его температура понизится и водяной пар будет сгущаться вблизи ионов в капельки воды. Вдоль пути полета частицы капельки воды образуют туманный след, являющийся линией ее движения. Этот след можно наблюдать непосредственно или сфотографировать; в последнем случае камера сбоку освещается сильным пучком световых лучей.

На рис. 21 приведены фотографии следов бета- и альфа-частиц. Нетрудно видеть, что оба типа следов резко отличаются друг от друга. След альфа-частиц очень жирный, что свидетельствует о большой плотности капелек вдоль пути альфа-частиц, а следовательно, и ионов. Бета-частица обладает значительно меньшей ионизирующей

способностью, поэтому ее след значительно более тонкий, чем у альфа-частицы.

Советскими учеными Л. В. Мысовским и А. П. Ждановым был разработан другой метод регистрации путей отдельных альфа-частиц, основанный на использовании толстослойных фото-



Рис. 21. Фотографический снимок следов альфа- и бета-частиц в камере Вильсона. Жирные линии — след альфа-частиц, тонкие линии — след бета-частиц

пластинок. Радиоактивные излучения оказывают на фотографические эмульсии такое же действие, как и свет. Альфа-частицы, проходя через зерна светочувствительного слоя (бромистое серебро), производят их ионизацию. Ионизированные зерна после проявления чернеют, в результате чего на фотопластинке возникает след, очень похожий на след частицы в камере Вильсона, только значительно короче. Так как следы альфа-частиц имеют небольшую длину (несколько сотых миллиметра),

то наблюдение их производится с помощью микроскопа.

Камера Вильсона и метод толстослойных фотопластинок являются важнейшими методами лабораторных исследований радиоактивных излучений, позволяющих определить их природу, а также энергию, пробег и ионизирующую способность частиц.

2. Принцип действия ионизационной камеры

Газ, изолированный от ионизирующего воздействия, совершенно не проводит электрического тока. Это объясняется тем, что носителями тока в газах являются ионы и свободные электроны, которые возникают в газе только в результате действия какого-либо внешнего ионизатора.

Внешними ионизаторами газа могут быть радиоактивные, рентгеновские, ультрафиолетовые и видимые излучения. Ионы в газе могут появляться тоже в результате нагрева газа до высоких температур.

Способность газов становиться проводниками электрического тока при воздействии на них радиоактивных излучений положена в основу действия большинства современных дозиметрических приборов. Основными элементами таких приборов являются ионизационные камеры и газовые счетчики.

Ионизационная камера представляет собой устройство из двух изолированных друг от друга электродов, к которым приложено постоянное напряжение.

В простейшем случае ионизационная камера (рис. 22) может быть выполнена в виде двух металлических параллельных пластин-электродов.

Пространство между пластинами, называемое рабочим объемом камеры, заполняется каким-либо газом, чаще всего воздухом.

В результате прохождения радиоактивного излучения через рабочий объем камеры в нем образуются положительные и отрицательные ионы.

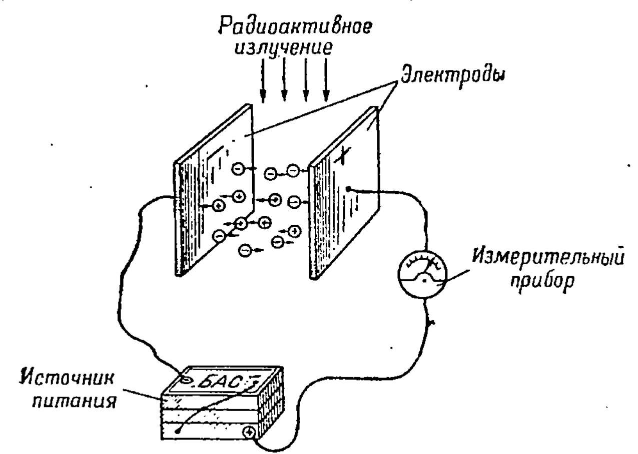


Рис. 22. Принцип действия ионизационной камеры

При отсутствии напряжения между пластинами ионы, как и все другие нейтральные атомы и молекулы газа, будут находиться в беспорядочном тепловом движении. Однако если к пластинам приложить напряжение, движение ионов становится направленным: положительные ионы под действием электрического поля будут приближаться к отрицательному электроду — катоду, отрицательные — к положительно заряженному электроду — аноду. Чем больше напряжение и чем меньше расстояние между пластинами, тем больше скорость движения ионов.

Направленное движение заряженных частиц и является причиной появления ионизационного тока в цепи камеры. Сила ионизационного тока равна суммарному электрическому заряду, принесенному ионами к поверхности электрода в течение одной секунды. Чем больше ионов собирается у электродов, тем больше сила тока. Этот ток может быть зарегистрирован с помощью какого-либо электроизмерительного прибора, включенного в цепь камеры. Вне зоны действия радиоактивных излучений ионы отсутствуют в рабочем объеме камеры, поэтому прибор не покажет тока (стрелка будет стоять на нуле).

Наряду с процессом ионизации в газе одновременно происходит и обратный процесс — рекомбинация, то есть соединение ионов противоположного знака, в результате чего образуется нейтральный атом или молекула. Из-за наличия рекомбинации не все ионы и электроны, образованные радиоактивным излучением, могут попасть на электроды. Особенно усиленный процесс рекомбинации имеет место при малых напряжениях. В этом случае бо́льшая часть ионов рекомбинируется и лишь незначительная часть попадает на электроды.

С увеличением напряжения возрастает скорость движения ионов и электронов, что приводит к уменьшению вероятности их рекомбинации. С уменьшением числа рекомбинирующихся ионов возрастает число ионов, попадающих на электроды, и, следовательно, возрастает ионизационный ток. На рис. 23 изображена вольт-амперная характеристика ионизационной камеры, то есть зависимость ионизационного тока от величины напряжения, приложенного к электродам. Области малых напряжений соответствует участок *ОА*.

Однако наступит момент (точка A на кривой рис. 23), когда увеличение напряжения уже не будет вызывать возрастания тока вследствие того, что практически все ионы будут собираться на электродах.

Ток, при котором практически все ионы, образующиеся в камере в результате воздействия

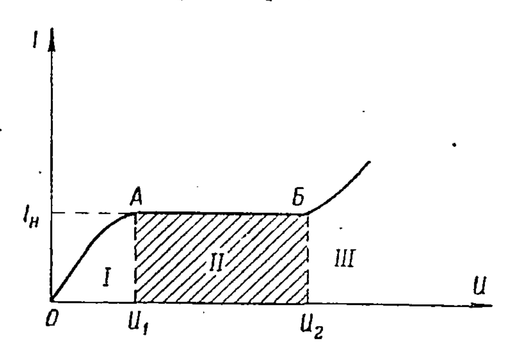


Рис. 23. Вольт-амперная характеристика ионизационной камеры:

I — область усиленной рекомбинации ионов; *II* — область тока насыщения; *III* — область газового усиления

ионизирующего излучения, собираются на электродах, называется током насыщения.

Участок *АБ* вольт-амперной характеристики соответствует режиму тока насыщения. При увеличении напряжения (больше U_2) ток в камере снова начинает возрастать за счет того, что электроны, образованные под воздействием излучения, приобретают достаточно большую скорость и в свою очередь начинают ионизировать газ, то есть за точкой *Б* начинается область газового усиления.

Ионизационные камеры работают, как правило, в области тока насыщения; величина этого тока пропорциональна числу образующихся ионов, и поэтому она может служить мерой ионизирующего действия излучения. По своему назначению ионизационные камеры разделяются на два типа:

1. Интегрирующие ионизационные камеры, которые используются для измерения суммарной ионизации, вызванной прохождением через камеру значительного количества ионизирующих частиц.

2. Счетно-ионизационные камеры, которые служат для регистрации и определения ионизирующего действия одной какой-либо ионизирующей частицы (например α-частицы), попавшей в рабочий объем камеры.

В интегрирующей ионизационной камере, если она работает в области насыщения, спустя очень небольшой промежуток времени после начала действия излучения наступает режим равновесия: число пар ионов, возникающих в камере за единицу времени, равно числу пар ионов, попадающих на электроды за то же время. Величина тока насыщения равна:

$$I_{н} = N \cdot e \cdot V, \qquad (7)$$

где N — число пар ионов, возникающих в 1 секунду в 1 $см^3$ камеры;
V — рабочий объем камеры;
e — заряд каждого иона.

Из формулы (7) следует, что величина тока насыщения может служить мерой мощности дозы излучения, которая пропорциональна числу пар ионов, образующихся в одном кубическом сантиметре в единицу времени.

Таким образом, ионизационные камеры, работающие в режиме тока насыщения, могут быть использованы для измерения мощности дозы излучения. Для этих целей шкала электроизмерительного прибора должна быть проградуирована не в единицах силы тока, а в единицах мощности дозы (рентген/час).

Несмотря на кажущуюся простоту устройства ионизационной камеры, при ее изготовлении и отладке встречаются серьезные трудности, связанные с измерением слабых ионизационных токов. Дело в том, что в ионизационных камерах сила ионизационного тока очень мала даже при сравнительно мощном излучении. Например, если рабочий объем камеры равен одному литру, то при мощности дозы излучения один рентген в час величина тока не превосходит одной десятимиллиардной доли ампера. Такие малые токи обычными электроизмерительными приборами могут быть измерены лишь после их предварительного усиления с помощью электронных усилителей.

3. Конструктивные особенности устройства ионизационных камер

Форма и размеры электродов ионизационной камеры, в зависимости от ее назначения, могут быть самыми разнообразными. Встречаются камеры, электроды которых выполнены в виде двух параллельных пластин, концентрических шаров и иной формы. Электроды изготовляются обычно из бакелита, плексигласа или другого легкого материала и покрываются тонким слоем графита. Часто электроды камеры изготовляют из проводящей пластмассы. Электрод камеры, к которому непосредственно подсоединяется полюс источника рабочего напряжения, называется

высоковольтным. Второй электрод, к которому подсоединяется прибор или усилитель для измерения силы ионизационного тока, называется собирающим. В полевой аппаратуре конструкция ионизационной камеры выполняется обычно так, что высоковольтный электрод представляет собой прямоугольную или цилиндрическую коробку, являющуюся корпусом камеры, внутри которой размещается собирающий (внутренний) электрод.

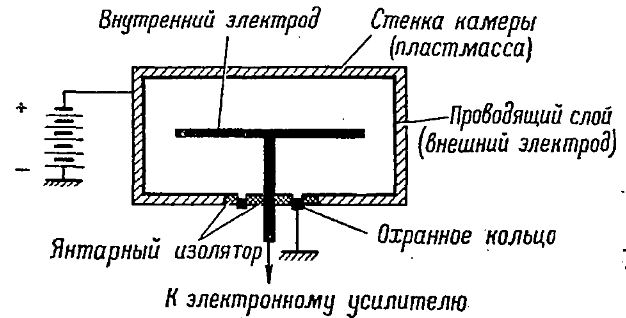


Рис. 24. Схема устройства ионизационной камеры

Вывод внутреннего электрода из корпуса камеры осуществляется через янтарный или полистироловый изолятор, имеющий очень хорошие изоляционные свойства. Между высоковольтным электродом и изолятором ставится так называемое охранное кольцо, соединенное с корпусом усилителя. Охранное кольцо предохраняет цепь собирающего электрода от токов утечки по изолятору между высоковольтным и собирающим электродами. Эти токи утечки всегда направлены в ту же сторону, что и ионизационный ток камеры, и могут привести к завышению показаний прибора.

На рис. 24 схематически изображена конструкция ионизационной камеры, внешний элек-

трод которой выполнен в виде коробки прямоугольного сечения, а внутренний — в виде Т-образного стержня.

Поскольку бета- и особенно альфа-частицы обладают небольшой проникающей способностью, ионизационная камера должна иметь окно, закрытое тонкой пленкой, через которое эти частицы могли бы проникать в рабочий объем камеры. При измерении альфа-излучения, кроме того, камеру необходимо подносить непосредственно к источнику излучения или лучше даже этот источник помещать непосредственно в рабочий объем камеры, так как альфа-частицы сильно поглощаются воздухом, окружающим прибор.

Гамма-лучи обладают большой проникающей способностью, они без заметного поглощения проходят через стенки камеры толщиной в несколько миллиметров, поэтому камера с такими стенками фактически открыта со всех сторон для проникновения внутрь ее гамма-квантов.

Стенки камеры оказывают большое влияние на измерение ионизирующего действия гамма-лучей. Нам уже известно, что ионизация вещества гамма-квантами производится за счет вторичных быстрых электронов, возникающих при взаимодействии гамма-квантов с атомами вещества. В камере эти вторичные электроны образуются как в газе, наполняющем ее рабочий объем, так и в ее стенках. Ионизирующее действие вторичных электронов, вырванных гамма-квантами из атомов материала стенки, принято называть действием стенки. Естественно, в рабочий объем камеры попадают только те вторичные электроны, которые возникают в поверхностном слое стенки камеры. Толщина этого слоя не превышает длины пробега электрона в веществе стенки, то есть

не более нескольких миллиметров, если стенки камеры изготовлены из пластмассы. Однако, поскольку плотность материала стенок в тысячи раз больше, чем плотность газа, то число вторичных электронов, образованных гамма-излучением в стенках и попавших в рабочий объем, в сотни раз больше, чем число вторичных электронов, возникающих непосредственно в газе. Это обстоятельство приводит к тому, что электроны, выбитые из стенки γ-квантами, создают основную ионизацию в рабочем объеме камеры и, следовательно, определяют величину ионизационного тока.

Наличие действия стенки обусловливает необходимость изготовления стенок камеры из воздухоэквивалентных материалов. К этим материалам относятся бакелит, плексиглас и другие легкие вещества. Дозы излучения в одном грамме воздуха и таких веществ равны в широком диапазоне энергий гамма-квантов, поэтому ионизация, создаваемая «действием стенки» из воздухоэквивалентного материала, оказывается пропорциональной ионизации воздуха. Это обстоятельство позволяет использовать камеры, стенки которых изготовлены из легких материалов, для измерения доз гамма-излучения, в состав которого входят гамма-кванты различных энергий, непосредственно в рентгенах.

4. Принцип действия газовых счетчиков

Как уже отмечалось, счетно-ионизационная камера может быть использована для регистрации отдельных частиц излучения, проходящих через ее рабочий объем, так как каждая частица, со-

здавшая ионы, вызовет в электрической цепи скачок (импульс) тока. Но в ионизационных камерах величины импульсов тока, создаваемых отдельными частицами, очень малы и для их измерения требуются сложные усилители. Поэтому ионизационные камеры находят применение главным образом для измерения суммарного ионизационного эффекта, вызванного прохождением большого числа частиц через их рабочий объем.

Для регистрации отдельных частиц, а также для измерения небольших мощностей доз гамма-излучения широкое применение нашли газовые счетчики. Устройство счетчиков принципиально ничем не отличается от устройства ионизационной камеры.

Если к электродам ионизационной камеры, изображенной на рис. 22, приложить напряжение, равное нескольким тысячам вольт, то ее можно превратить в газовый счетчик. С увеличением напряжения растет скорость электронов, двигающихся к положительному электроду. При некотором напряжении скорость электронов может достигнуть такой величины, что при встрече с нейтральными атомами и молекулами они сами ионизируют их. Это явление получило название ударной ионизации. В результате ударной ионизации один первоначальный электрон после столкновения с нейтральным атомом создает еще два иона. Эти ионы, приобретая большие скорости, в свою очередь создают новые ионы и т. д. После десятого столкновения от каждого начального электрона возникает уже тысяча ионов. Число ионов растет, как снежный ком, катящийся с горы. Таким путем небольшое число первичных ионов, созданных ионизирующей частицей, умножается в миллионы раз, что приводит к резкому

возрастанию тока по сравнению с током, созданным той же ионизирующей частицей в ионизационных камерах.

На рис. 25 показана конструкция счетчика. Он обычно состоит из тонкостенного металлического цилиндра, вдоль оси которого установлена металлическая нить. Нить является анодом, ци-

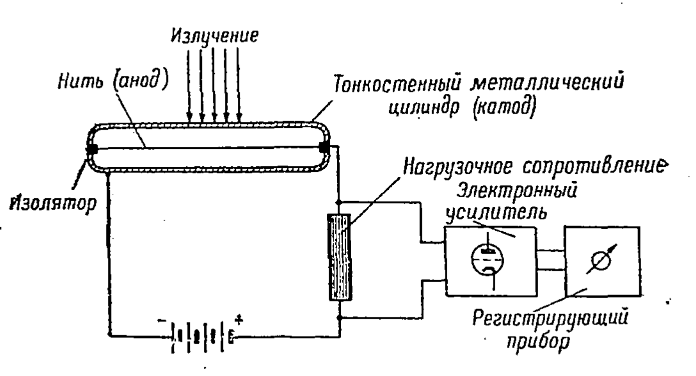


Рис. 25. Устройство и схема включения газового счетчика

линдр — катодом. Пространство между цилиндром и нитью заполнено газом при пониженном давлении. В качестве наполнителей берутся обычно инертные газы (аргон, неон или их смесь), в которых отрицательными ионами являются электроны. Выбор этих газов объясняется тем, что электроны, обладая массой в несколько тысяч раз меньшей, чем у ионов, более подвижны и их легче разогнать до скоростей, при которых начинается ударная ионизация. Применение анода в виде тонкой металлической нити радиусом в десятые доли миллиметра позволяет значительно снизить величину напряжения, при кото-

ром начинается ударная ионизация. Если для плоских электродов величина этого напряжения равна нескольким тысячам вольт, то для цилиндрических электродов она равна всего нескольким сотням вольт, поэтому газовые счетчики всегда выполняются цилиндрическими.

Рассмотрим, каким образом счетчик может быть использован для регистрации частиц радиоактивного излучения. При отсутствии радиоактивного излучения газ, наполняющий счетчик, состоит из нейтральных атомов и не проводит электрического тока, электрическая цепь счетчика разомкнута и ток по ней не течет. Предположим, что внутрь цилиндра проникла ионизирующая частица, которая создала на своем пути хотя бы одну пару ионов. Под действием сил электрического поля положительный ион устремляется к катоду, а электрон — к нити (аноду). Сила, действующая на электрон, возрастает по мере его приближения к нити, поэтому электрон быстро разгоняется до таких скоростей, при которых он начинает ионизировать ударом встретившиеся на его пути нейтральные атомы и молекулы газа. В результате этого вблизи нити создается целая лавина электронов и положительных ионов. За время, равное примерно одной миллионной доле секунды, все электроны соберутся на нити. Относительно тяжелые и поэтому малоподвижные положительные ионы за это время практически не сдвинутся с места. В следующей стадии электрического разряда ионы движутся к катоду, это продолжается примерно в течение одной десятитысячной секунды. Ионы, подошедшие к катоду, вырывая из его стенки электроны, нейтрализуются, то есть превращаются в нейтральные атомы и молекулы газа.

Движение ионов и электронов вызывает в электрической цепи счетчика импульс тока. В цепь анода включается сопротивление; ток, проходя по этому сопротивлению, создает импульс напряжения. Таким образом частица, прошедшая через счетчик, регистрируется им в виде импульса напряжения.

После усиления импульс напряжения подается к регистрирующему прибору, автоматически считающему импульсы, а значит, и частицы, проходящие через рабочий объем счетчика.

До тех пор, пока положительные ионы не отойдут на достаточно большое расстояние от анода, возникновение следующей лавины ионов в счетчике невозможно, так как положительно заряженный «чехол» ионов резко уменьшает напряженность электрического поля вблизи нити. Поэтому, пока ионы находятся вблизи анода, счетчик остается «равнодушным» ко всякой новой частице.

Время собирания положительных ионов на катоде счетчика принято называть мертвым временем. Мертвое время газовых счетчиков относительно большое — 0,0001 сек., что является их существенным недостатком, так как при интенсивном потоке частиц многие из них могут быть незарегистрированы.

Как уже отмечалось, положительные ионы вблизи катода превращаются в нейтральные атомы или молекулы, присоединяя к себе электроны, вырванные ими из стенки катода. Молекулы газа, присоединившие к себе электроны, находятся в возбуждённом состоянии, и, приходя в нормальное состояние, они испускают кванты ультрафиолетового излучения. Под действием этих квантов из катода может быть выбит элек-

трон, который явится причиной новой электронной лавины, так как счетчик подготовлен к следующему разряду (положительные ионы собрались у катода). Таким образом в газовом счетчике существуют условия для возникновения целой серии разрядов, следующих за первоначальным, если не будут приняты специальные меры по гашению разряда.

В зависимости от способа гашения разряда счетчики делятся на самогасящиеся и несамогасящиеся.

В несамогасящихся счетчиках для гашения разряда в цепь счетчика включается высокоомное сопротивление величиной около одного миллиарда ом. Ток, возникший в результате движения ионов, создает на этом сопротивлении большое падение напряжения, за счет чего происходит снижение потенциала нити и разряд гаснет. Однако из-за большой величины гасящего сопротивления изменение напряжения на нити происходит медленно, вследствие чего эти счетчики очень инерционны.

Для уменьшения инерционности несамогасящихся счетчиков часто используются специальные гасящие электронные устройства, с помощью которых удается уменьшить величину гасящего сопротивления в десятки и сотни раз.

Наиболее широкое распространение в настоящее время получили самогасящиеся счетчики, которые имеют меньшую инерционность. Для гашения разряда в этих счетчиках к одноатомному газу добавляется многоатомный газ (например, пары спирта). При добавке многоатомного газа разряд в счетчике ограничивается лишь одной вспышкой. Это объясняется тем, что ионы одноатомного газа, под

воздействием которых могут быть выбиты электроны из катода, еще до прихода к нему полностью нейтрализуются, вырывая электроны из молекул многоатомного газа. Ионизированные же молекулы многоатомного газа при подходе к катоду распадаются (диссоциируют), прежде чем успевают вырвать из катода электроны, которые могут быть причиной возникновения новой вспышки разряда. Недостатком этого типа самогасящихся счетчиков является их ограниченный срок жизни ввиду распада молекул многоатомного газа. Счетчики выходят из строя после 10^8—10^9 разрядов. Рабочее напряжение таких счетчиков находится в пределах 700—1000 вольт. Значительно лучшими свойствами обладают самогасящиеся счетчики, в которых в качестве гасящей примеси применены галогены (хлор или бром). Принцип гашения разряда в таких счетчиках аналогичен спиртовым, но в отличие от последних диссоциировавшая молекула хлора или брома восстанавливается. Поэтому такие счетчики теоретически должны иметь бесконечно большой срок службы. Практически срок службы галогенных счетчиков ограничен, но он все же значительно больше срока службы спиртовых счетчиков. Способность к восстановлению молекул гасящей примеси делает галогенный счетчик устойчивым в работе при больших скоростях счета, а также позволяет использовать его в так называемом токовом режиме. В токовом режиме измеряется не число импульсов, а величина среднего тока в цепи счетчика, что позволяет расширить верхний предел измеряемых интенсивностей излучения.

Наконец, существенным преимуществом галогенных счетчиков является их устойчивая работа

при низких температурах (до —50° С) и пониженных рабочих напряжениях (350—400 вольт), что делает их наиболее пригодными для применения в полевой дозиметрической аппаратуре.

5. Типы газовых счетчиков и области их применения

На рис. 26 изображена зависимость величины собранного заряда Q на электродах счетчика от

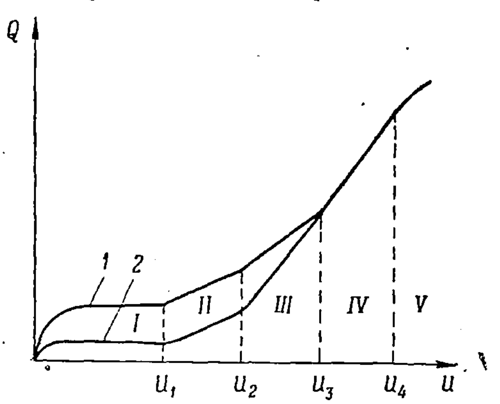


Рис. 26. Зависимость величины собранного заряда Q от напряжения на газовом счетчике:

I — область ионизационной камеры; *II* — область пропорционального усиления; *III* — область ограниченной пропорциональности; *IV* — область самостоятельного (гейгеровского) разряда; *V* — область непрерывного разряда

приложенного к нему напряжения. Кривая *1* соответствует разряду, вызванному прохождением через счетчик частицы с большой ионизирующей способностью (например α-частицы), кривая *2* соответствует разряду от частицы с меньшей ионизирующей способностью (β-частицы).

При напряжениях, меньших U_1, счетчик работает в режиме ионизационной камеры, т. е. величина собранного заряда Q равна суммарному заряду ионов q, образованных в процессе ионизации, причем для частиц с большой ионизирующей способностью, естественно, величина собранного заряда должна быть больше. При дальнейшем увеличении напряжения начинается ударная ионизация, в результате которой происходит размножение ионов и электронов и, следовательно, резкое увеличение собранного заряда Q по сравнению с зарядом q, образованным ионизирующей частицей. В диапазоне напряжений от U_1 до U_2 счетчик работает в режиме пропорционального усиления, то есть величина собранного заряда $Q = A \cdot q$, где A — коэффициент газового усиления, вызванного ударной ионизацией. Счетчики, работающие в этой области напряжений, получили название пропорциональных. Если пренебречь утечкой заряда с электродов в процессе собирания ионов, то амплитуда импульса напряжения в пропорциональном счетчике равна

$$\Delta U = \frac{Q}{c} = A \cdot \frac{q}{c},$$

где ΔU — амплитуда импульса напряжения, снимаемого с нагрузочного сопротивления,
c — электрическая емкость счетчика.

Таким образом, в пропорциональных счетчиках амплитуда импульса напряжения ΔU пропорциональна заряду q, то есть первоначальной ионизации, созданной регистрируемой частицей. Поэтому такие счетчики могут быть использованы не только для счета частиц, но и для определения их ионизирующего действия. Однако коэффициент газового усиления A в пропорциональных

счетчиках сравнительно невелик (около 10 000), поэтому они находят применение главным образом для регистрации частиц с большой ионизирующей способностью (альфа-частиц). В частности, с помощью этих счетчиков можно определять интенсивность α-излучения в присутствии β-излучения, так как импульс напряжения, создаваемого альфа-частицей, будет по амплитуде в сотни раз больше импульса от β-частицы.

На участке от U_2 до U_3 (см. рис. 26) счетчик вступает в режим ограниченной пропорциональности — для частиц с меньшей ионизирующей способностью газовое усиление больше, чем для частиц с большей ионизирующей способностью. Наконец, при некотором напряжении U_3 счетчик вступает в режим самостоятельного разряда: для частиц с малой и большой ионизирующей способностью величина собранного заряда Q остается одной и той же. Счетчики, работающие в таком режиме, получили название счетчиков Гейгера-Мюллера. У этих счетчиков величина импульса напряжения не зависит от первоначальной ионизации, поэтому они не могут служить непосредственно для измерения ионизирующего действия излучения. Но эти счетчики обладают огромной чувствительностью: достаточно в счетчике появиться хотя бы одному электрону, как в нем развивается мощная электронная лавина.

Если напряжение на счетчике превысит напряжение U_4, счетчик вступает в область непрерывного разряда и поэтому не может быть использован для регистрации ионизирующих частиц.

Важнейшей характеристикой газовых счетчиков является их эффективность. Эффективностью счетчика называется отношение числа частиц, вызвавших разряд, к общему числу частиц, попавших в

счетчик. Эффективность газовых счетчиков к альфа- и бета-частицам близка к 100%. Эффективность счетчиков к гамма-квантам составляет 0,2—1,5%.

Регистрация гамма-квантов счетчиками, как и в ионизационных камерах, происходит главным образом за счет вторичных электронов, выбиваемых гамма-квантами из стенок счетчика. Выбитые из стенки счетчика электроны, попадая в рабочий объем, вызывают в нем газовый разряд. Эффективность счетчика зависит от энергии гамма-кванта. Например, у газового счетчика с катодом из алюминия с увеличением энергии гамма-кванта от 0,4 мэв до 2 мэв эффективность возрастает от 0,2% до 1,2%. Поэтому, если энергия регистрируемых гамма-квантов неизвестна, ошибки в определении числа гамма-квантов, прошедших через счетчик, могут быть велики. Если же энергия квантов известна, то число гамма-квантов, прошедших через счетчик, равно:

$$N = \frac{n}{\varepsilon} \cdot 100,$$

где N — число гамма-квантов, прошедших через счетчик;

n — число зарегистрированных гамма-квантов, то есть гамма-квантов, вызвавших разряд;

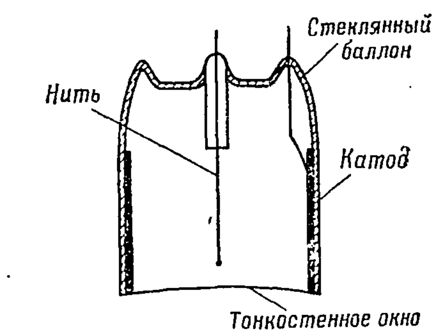
ε — эффективность счетчика в процентах для гамма-квантов данной энергии.

Различия в конструкциях счетчиков определяются в основном их назначением.

Счетчики для измерения потока α-частиц должны иметь окно, затянутое тонкой слюдяной пленкой толщиной $(1 \div 2)10^{-3}$ см, в которой не происходит значительного уменьшения энергии α-частиц.

Разрез счетчика такого типа показан на рис. 27. Окно находится в торце счетчика, поэтому счетчики этого типа называют торцевыми.

Рабочее напряжение на α-счетчик подается такой величины, чтобы он работал в пропорциональ-



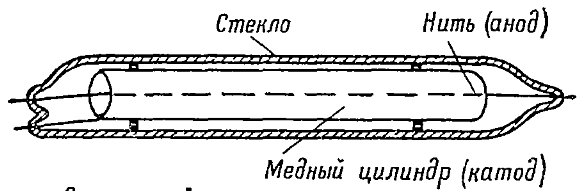


Рис. 27. Конструкции газовых счетчиков

ной области. Тогда импульсы от α-частиц будут иметь величину в 30—50 раз больше, чем от β-частиц и γ-квантов. При повышении рабочего напряжения до определенной величины этот счетчик переходит в область самостоятельного разряда и может быть использован для счета β-частиц и γ-квантов.

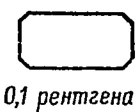
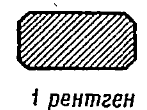
Торцевые счетчики применяются также для регистрации потока β-частиц. В этом случае толщина слюдяной пленки, закрывающей окно счетчика, берется равной $(2 \div 6)10^{-3}$ см. Поглощение β-частиц даже малых энергий (до 0,05—0,1 мэв) в такой пленке невелико.

Для регистрации потока β-частиц сравнительно большой энергии (выше 0,5—1 мэв) применяются цилиндрические счетчики (см. рис. 25), стенки которых изготовлены из алюминия, стали толщиной $(1 \div 3)10^{-2}$ см. Такие счетчики имеют бóльшую чувствительность, чем торцевые, так как их рабочая поверхность значительно больше, чем у торцевых, и находят широкое применение в полевой дозиметрической аппаратуре. Для регистрации потока γ-квантов применяются счетчики цилиндрической формы, имеющие стенки толщиной несколько миллиметров. Обычно при измерениях потока гамма-квантов применяются цилиндрические β-счетчики с дополнительными чехлами, в которых полностью поглощаются β-частицы. На рис. 27 показана конструкция стеклянного гамма-счетчика.

6. Фотографический и химический методы измерения доз гамма-излучения

Фотографические пленки нашли широкое применение для измерения доз гамма-излучения. В отличие от альфа-частиц, гамма-кванты, воздействуя на фотоэмульсию, не образуют следов, а вызывают общее почернение пленки. Степень (плотность) почернения пленки пропорциональна дозе гамма-излучения. На рис. 28 изображены проявленные фотопленки при облучении их различными дозами гамма-излучения. С помощью

фотопленок можно измерять дозы гамма-излучения от сотых долей рентгена до нескольких тысяч, однако при этом должны использоваться пленки, имеющие различную чувствительность. Определение плотности потемнения пленки производится с помощью специальных приборов, получивших название денситометров. Для определения дозы в рентгенах плотность потемнения пленки сравнивается с плотностью потемнения другой пленки, которая была засвечена гамма-


0,1 рентгена *1 рентген* *10 рентгенов*

Рис. 28. Проявленные фотопленки при облучении их различными дозами гамма-излучения

излучением, создавшим известную дозу. Перед измерением пленки завертываются в непрозрачную для видимого света бумагу и помещаются в металлическую кассету.

Сравнение плотностей потемнения двух пленок можно производить лишь в том случае, если их проявление проведено в строго одинаковых условиях. Проявление должно производиться в одном и том же бачке, при постоянной концентрации и температуре проявителя, а также времени проявления.

Зависимость плотности потемнения от дозы для данного сорта фотопленки показана на рис. 29. До некоторого значения дозы $Д_1$, плотность потемнения прямо пропорциональна дозе $Д$, далее плотность потемнения увеличивается медленнее, чем доза, и, наконец, начиная от значе-

ний $Д_2$, при увеличении дозы наблюдается уже убывание плотности потемнения. Последнее обстоятельство может явиться причиной грубых ошибок в измерении дозы, так как одной и той же плотности потемнения соответствуют два ее значения. Поэтому чувствительность фотопленки должна подбираться такой, чтобы исключить

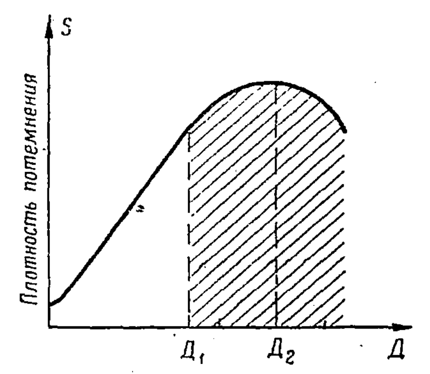


Рис. 29. Зависимость плотности потемнения фотопленки от величины дозы

возможность работы на последнем участке кривой зависимости плотности потемнения от величины дозы.

Установлено, что если фотопленки подвергаются воздействию гамма-квантов с энергией менее 0,3 мэв, плотность потемнения их зависит не только от величины дозы, но и жесткости излучения, то есть от энергии гамма-квантов. Иначе говоря, при одних и тех же дозах излучения, но различных энергиях гамма-квантов плотности потемнения фотопленок получаются разными. Это обстоятельство является существенным недостат-

ком фотографического метода, так как может привести к грубым ошибкам измерения доз смешанного гамма-излучения, в состав которого входят гамма-кванты с энергией менее 0,3 мэв.

При энергиях гамма-квантов более 0,3 мэв плотность потемнения фотопленки, оставаясь пропорциональной дозе излучения, не зависит от энергии гамма-кванта. Для устранения зависи-

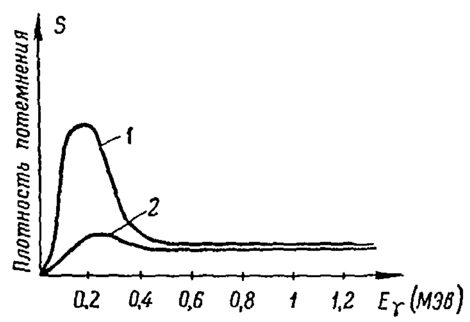


Рис. 30. Зависимость плотности потемнения фотопленки от энергии гамма-квантов (величина дозы постоянная)

мости плотности потемнения от энергии гамма-кванта фотопленка с обеих сторон закрывается свинцовыми или кадмиевыми листами толщиной 1 мм. Такие металлические фильтры почти без заметного поглощения пропускают гамма-кванты больших энергий и сильно ослабляют гамма-излучение с энергиями гамма-квантов менее 0,3 мэв. В результате этого зависимость плотности потемнения пленки от энергии гамма-квантов в значительной мере сглаживается, то есть плотность потемнения при одних и тех же дозах излучения остается постоянной в более широком диапазоне энергий гамма-квантов. На рис. 30 показана за-

висимость плотности потемнения пленки от энергии гамма-квантов без кадмиевого фильтра (кривая *1*) и с кадмиевым фильтром (кривая *2*). Из рисунка видно, что чувствительность фотопленки с кадмиевым фильтром в области малых энергий снижается в несколько раз.

В настоящее время разрабатывается другой интересный метод измерения доз гамма-излучения. Этот метод основан на химическом действии излучения. В результате ионизирующего действия излучения и последующих химических процессов некоторые растворы химических веществ меняют свой цвет, причем густота окраски пропорциональна дозе гамма-излучения. На основе этого метода можно создать очень простые приборы для измерения доз гамма-излучения. Определение густоты окраски раствора, как и плотности потемнения фотопленки, производится с помощью денситометра. Однако отсутствие процесса проявления, требующего больших затрат времени, позволяет считать химический метод измерения доз гамма-излучения более перспективным, чем фотографический, особенно в полевых условиях.

7. Сцинтилляционные счетчики

Еще в начале XX века было установлено, что под действием радиоактивных излучений некоторые вещества начинают испускать свет. Такие вещества называются люминесцирующими. К ним относятся сернистый цинк, иодистый натрий, кристаллы нафталина, антрацена и многие другие как твердые, так и жидкие вещества.

Прохождение альфа-, бета-частицы или гамма-кванта через люминесцирующие вещества вызывает вспышку света, названную сцинтилляцией.

Вспышка света возникает в результате ионизации атомов люминесцирующего вещества. У ионизированных атомов происходит перегруппировка электронов: места электронов, выбитых ионизирующей частицей из внутренних слоев атома, занимаются электронами наружных слоев. Этот процесс перегруппировки электронов сопровождается испусканием фотонов ультрафиолетового или видимого света, которые и создают вспыш-

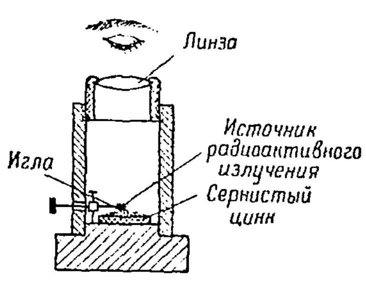


Рис. 31. Устройство спинтарископа

ки — сцинтилляции. Чем больше ионизирующая способность частицы, тем больше ионизированных атомов она создает и тем ярче вспышка света. Интенсивность сцинтилляций пропорциональна интенсивности радиоактивного излучения, поэтому, подсчитывая число вспышек, можно определить поток ионизирующих частиц, прошедших через люминесцирующее вещество.

Вспышки, создаваемые альфа-частицами, имеющими большую ионизирующую способность, могут быть обнаружены глазом. На этом принципе был построен прибор, получивший название спинтарископа. На рис. 31 изображен разрез спинтарископа. Он состоит из пластины, на которую нане-

сен слой люминесцирующего вещества (обычно сернистый цинк); иголки, на острие которой находится ничтожное количество альфа-активного вещества, и оптической линзы. Если посмотреть внутрь этого прибора, то можно увидеть, как на пластинке с сернистым цинком возникают и тотчас же гаснут зеленовато-желтые вспышки. Каждая отдельная вспышка есть результат удара одной альфа-частицы о пластинку. Подсчитывая число таких вспышек за определенный промежуток времени, можно определить число излучаемых альфа-частиц и, следовательно, активность вещества. Однако такой способ регистрации потока альфа-частиц даже при применении его в лабораторных условиях обладает существенными недостатками. С помощью спинтарископа можно подсчитать вспышки для очень небольшого количества радиоактивного вещества, так как при большом числе вспышек глаз перестает различать отдельные вспышки и, кроме того, с утомлением глаза наблюдателя точность подсчета быстро падает. Поэтому этот метод был совершенно вытеснен другим методом счета частиц.

Однако в последние годы метод счета сцинтилляций вновь возродился на новой основе. Сцинтилляции, возникающие в люминесцирующем веществе, регистрируются не глазом, а высокочувствительным прибором — фотоумножителем, изобретенным советским инженером Л. А. Кубецким. С помощью фотоумножителей можно регистрировать не только сцинтилляции, вызванные сильно ионизирующими альфа-частицами, но и сцинтилляции, вызванные бета-частицами и гамма-квантами.

На рис. 32 изображена принципиальная схема сцинтилляционного счетчика. Счетчик состоит из

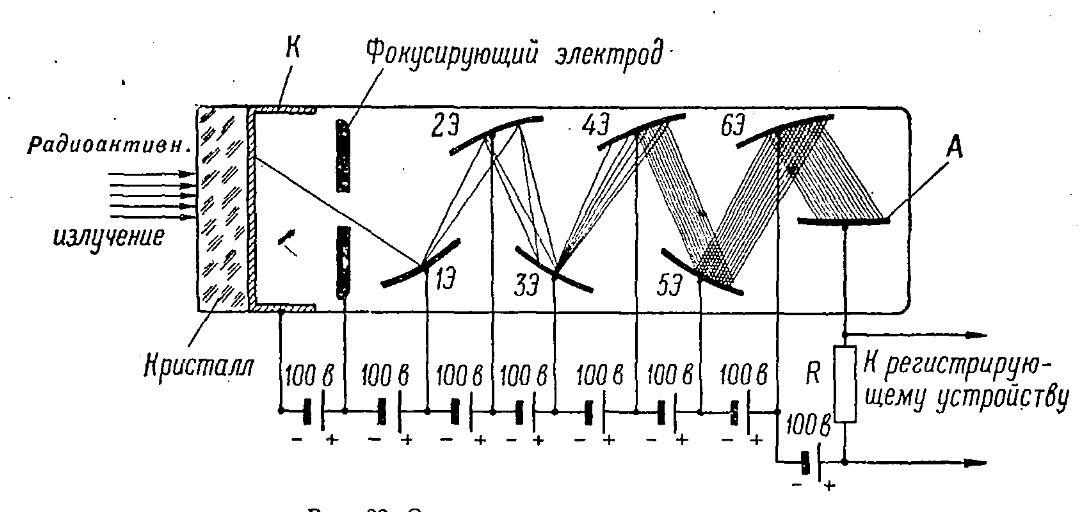


Рис. 32. Схема сцинтилляционного счетчика

люминесцирующего кристалла, преобразующего энергию радиоактивных излучений в световую, и фотоумножителя, регистрирующего отдельные световые вспышки в виде импульсов тока. Фотоумножитель представляет собой цилиндрическую стеклянную колбу, из которой откачан воздух. Внутри колбы имеется система электродов. Первым электродом является фотокатод *К*, нанесенный на внутреннюю поверхность колбы в виде тонкого полупрозрачного слоя вещества, способного легко испускать электроны под действием света. В современных фотоумножителях для сцинтилляционных счетчиков используются главным образом сурьмяно-цезиевые фотокатоды, так как они из всех известных фотокатодов обладают максимальным квантовым выходом. Квантовый выход — число электронов, вырываемых одним квантом света при падении его на фотокатод. За фотокатодом находится фокусирующий электрод, выполненный в виде пластинки с круглым отверстием. Далее находится ряд электродов, получивших название эмиттеров, что означает — испускатели, и, наконец, последним электродом является анод. Катод находится под наиболее низким потенциалом, на каждый последующий электрод (эмиттер) подается напряжение примерно на 100 вольт более высокое, чем на предыдущий. Под наиболее высоким потенциалом находится анод; разность потенциалов между анодом и катодом у современных фотоумножителей составляет 700 ÷ 1200 вольт.

Частица радиоактивного излучения, проходя через кристалл, вызывает кратковременные вспышки света. Часть световых квантов, образованных в кристалле, поскольку он выполнен из прозрачного материала, попадает на фотокатод и

выбивает из него электроны. Общее число возникших электронов при прохождении одной ионизирующей частицы через кристалл не превышает тысячи, а их суммарный заряд составляет ничтожно малую величину ($\sim 10^{-16}$ кулона). Такой заряд не только измерить, но и обнаружить без последующего усиления чрезвычайно трудно. Наличие эмиттеров в фотоумножителе позволяет «размножить» электроны в сотни тысяч раз. Принцип действия фотоумножителя состоит в следующем. Выбитые из фотокатода электроны под действием электрического поля ускоряются и с помощью фокусирующего электрода собираются на первом эмиттере (1-Э). Каждый электрон, попавший на эмиттер, выбивает из него 3—4 новых электрона. Электроны, вылетевшие из первого эмиттера, разгоняясь электрическим полем, направляются ко второму эмиттеру и выбивают еще по 3—4 электрона, которые устремляются к третьему эмиттеру, где повторяется то же самое. Процесс размножения электронов повторяется на всех последующих эмиттерах. Электронный поток с последнего эмиттера собирается на аноде. Общий коэффициент усиления фотоумножителя равен

$$K = \sigma^n,$$

где σ — коэффициент размножения электронов одним эмиттером;

n — общее число эмиттеров.

У современных фотоумножителей коэффициент размножения σ, если разность потенциалов между соседними эмиттерами равна ~ 100 вольтам, равен приблизительно 4. Поэтому фотоумножитель, содержащий 10 эмиттеров, имеет общий коэффициент усиления $K = \sigma^n = 4^{10} \approx 10^6$ раз.

Собранные на аноде электроны, стекая с анода через нагрузочное сопротивление R, создают на этом сопротивлении кратковременный импульс напряжения, который может быть сравнительно просто измерен.

Таким образом, прохождение ионизирующей частицы через кристалл сцинтилляционного счетчика отмечается кратковременным импульсом напряжения. Амплитуда импульса напряжения в этих счетчиках в отличие от газовых счетчиков с самостоятельным разрядом пропорциональна ионизирующей способности радиоактивных частиц, поэтому сцинтилляционные счетчики непосредственно могут быть использованы не только для счета частиц, но и для измерения ионизирующего действия радиоактивных излучений. Сцинтилляционный счетчик имеет большую эффективность регистрации всех видов радиоактивных излучений, которая в области гамма-лучей доходит до 20% и более. Кроме того, сцинтилляционные счетчики обладают небольшим «мертвым» временем. «Мертвое» время этих счетчиков, обусловленное длительностью световой вспышки в кристалле ($\sim 10^{-8}$ сек.) и временем прохождения электронов через фотоумножитель ($\sim 10^{-9}$ сек.), на много меньше, чем у газовых счетчиков.

Наиболее пригодными люминесцирующими веществами для применения их в сцинтилляционных счетчиках оказались кристаллы иодистого натрия, иодистого кальция и некоторые другие. Применение этих кристаллов обеспечивает высокую эффективность регистрации γ-излучения и наибольшее отношение величины световой энергии, испускаемой кристаллом, к величине энергии, которую в нем растратила ионизирующая частица. Крупным недостатком кристаллов на-

трий — под является их быстрое помутнение под воздействием влаги. Для защиты этого кристалла от влаги его приходится помещать в стеклянные футляры, которые сильно поглощают бета- и особенно альфа-излучение.

К недостаткам сцинтилляционных счетчиков следует отнести:

— необходимость стабильного источника высокого напряжения для питания фотоумножителя;

— явления старения фотокатодов и «утомляемости» эмиттеров, которые проявляются в потере чувствительности фотоумножителя при его продолжительной работе; особенно быстро уменьшается чувствительность фотоумножителя при больших интенсивностях светового и, следовательно, радиоактивного излучения;

— большой разброс параметров у различных фотоумножителей, что затрудняет массовое производство сцинтилляционных счетчиков.

Несмотря на эти недостатки, высокая эффективность и большая разрешающая способность сцинтилляционных счетчиков позволяет утверждать, что эти счетчики при дальнейшем усовершенствовании фотоумножителей и кристаллов найдут широкое применение не только в лабораторной, но и полевой дозиметрической аппаратуре.

——— o ———

IV. ПОЛЕВЫЕ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

1. Радиоактивное заражение местности при атомном взрыве

Как уже указывалось, атомный взрыв сопровождается образованием большого количества радиоактивных веществ, которыми могут быть заражены местность и воздух в районе взрыва, а также люди, вооружение и техника, находящиеся вне укрытий. Радиоактивное заражение местности может иметь место и по пути движения радиоактивного облака, образовавшегося при взрыве.

Источниками радиоактивного заражения местности являются:

— радиоактивные продукты деления атомного заряда бомбы;

— непрореагировавшая часть заряда;

— искусственные радиоактивные изотопы, образовавшиеся под воздействием потока нейтронов в материале оболочки бомбы, в поверхностном слое почвы, в вооружении и других предметах, находящихся на поверхности земли.

Радиоактивные продукты деления являются основным источником заражения местности. Это бета- и бета-гамма-активные изотопы приблизи-

тельно тридцати химических элементов средней части таблицы Менделеева, образовавшиеся в результате деления ядер атомов урана 235 (233) или плутония 239.

Активность продуктов деления по бета-излучению примерно в 2—3 раза больше, чем по гамма-излучению. Продукты деления являются сложной смесью радиоактивных веществ, в состав которой входят изотопы, имеющие период полураспада от долей секунды до нескольких лет. Долгоживущих изотопов в радиоактивных продуктах деления очень небольшое количество, поэтому активность продуктов быстро падает. Если активность осколков деления через час после взрыва принять за 100%, то через день их активность составит 2,0%, а через неделю — 0,2%, что объясняется быстрым превращением большинства радиоактивных веществ в стабильные нерадиоактивные изотопы. Поэтому даже сильно зараженные участки местности через некоторое время становятся слабо зараженными и неопасными для людей, находящихся на этих участках.

Непрореагировавшая часть атомного заряда, представляющая собой неразделившиеся атомы урана 235 или плутония 239, является альфа-активным веществом. Ввиду большого периода полураспада плутония и особенно урана активность этих продуктов очень небольшая.

Если общая активность продуктов взрыва через час после взрыва составляет тысячи миллиардов кюри, то активность непрореагировавшей части плутония равна нескольким тысячам кюри, а урана 235 — доли кюри. Даже спустя несколько лет активность непрореагировавшей части заряда в несколько раз меньше активности продуктов деления.

Третьим источником радиоактивного заражения местности является радиоактивность, наведенная под воздействием нейтронов, испускаемых при взрыве. Нейтроны, достигая поверхности земли, вызывают искусственную радиоактивность ряда элементов (кремний, натрий, алюминий, медь, цинк и др.), входящих в состав грунта и конструкций боевой техники. Однако образующиеся при этом радиоактивные изотопы имеют очень небольшой период полураспада (от нескольких суток до нескольких минут). Наибольшее значение в наведенной радиоактивности имеет радиоактивный натрий 24, образующийся в поверхностных слоях почвы и в морской воде. Этот изотоп излучает бета- и гамма-лучи. Однако и этот изотоп может заметно усиливать общую зараженность лишь на небольших расстояниях от места взрыва, где он образуется в заметных количествах. Кроме того, натрий 24 имеет период полураспада 15 часов, поэтому его активность быстро падает (радиоактивный натрий превращается в стабильный изотоп магния).

Степень заражения местности при атомном взрыве существенно зависит от высоты взрыва, а также метеорологических условий.

При воздушном взрыве (высота центра взрыва несколько сот метров над поверхностью земли) оседание радиоактивных продуктов в районе взрыва практически отсутствует. Это объясняется тем, что огненный шар (рис. 33), внутри которого находятся в газообразном состоянии радиоактивные вещества, не касается земли, и поэтому почти все радиоактивные продукты взрыва уносятся вверх быстро поднимающимся радиоактивным облаком. Облако (рис. 33) в течение нескольких минут поднимается на высоту более 10 километров и

затем рассеивается ветром на большой площади. Радиоактивное заражение в районе воздушного атомного взрыва обусловливается главным образом наведенной радиоактивностью, которая бы-

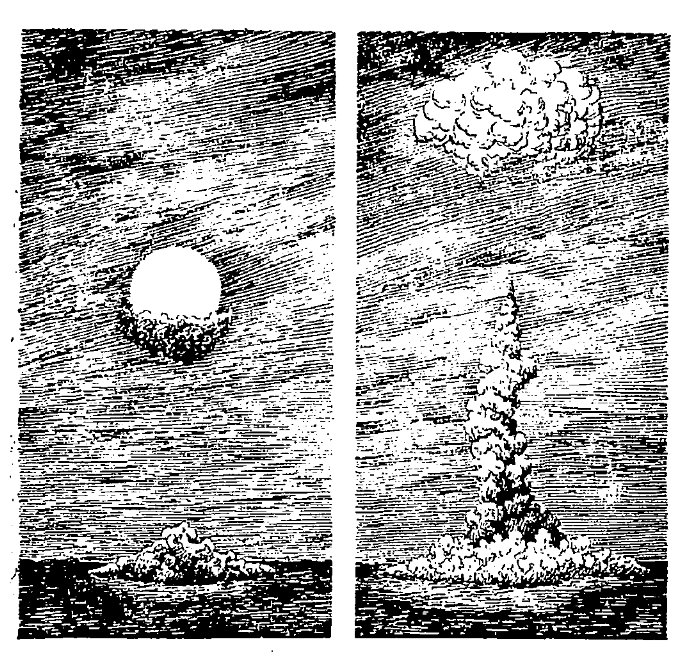


Рис. 33. Огненный шар и радиоактивное облако при воздушном атомном взрыве

стро падает. Поэтому воздушный атомный взрыв характеризуется слабым заражением местности. Например, в городах Нагасаки и Хиросима, где американцами были произведены воздушные взрывы, вообще не было поражений людей радиоактивными веществами.

Наземный атомный взрыв характеризуется более сильным радиоактивным заражением местности, так как раскаленные продукты взрыва, имеющие очень высокую температуру, непосредственно соприкасаются с поверхностью земли. В результате этого расплавленный верхний слой почвы смешивается с радиоактивными продуктами, находящимися в огненном полушарии



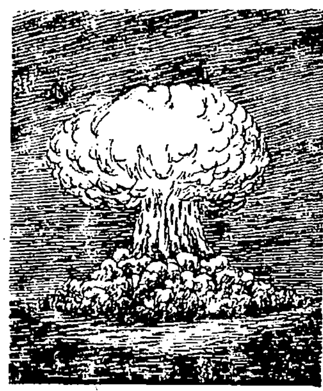


Рис. 34. Огненное полушарие и радиоактивное облако *при наземном атомном взрыве*

(рис. 34). Радиоактивно зараженный расплавленный грунт, разбрасываемый ударной волной на расстояние нескольких сот метров от центра взрыва, после остывания превращается в радиоактивный шлак, которым заражается местность и предметы, находящиеся на ней. При наземном взрыве столбы пыли (рис. 34), поднятые ударной волной, достигают радиоактивного облака. Радиоактивные вещества, осевшие на наиболее крупных частицах, сравнительно быстро выпадают из облака, создавая заражение по пути его

движения. Особенно сильное заражение имеет место по пути движения радиоактивного облака водородного взрыва, что отчетливо выявилось при испытании американцами водородной бомбы в марте 1954 года в районе Тихого океана. Японские рыбаки, находившиеся на расстоянии более 100 км от места водородного взрыва, были поражены выпавшим из облака радиоактивным пеплом.

При подводном взрыве большая часть радиоактивных веществ остается в воде, поэтому объем воды, находящийся вблизи взрыва, может оказаться сильно заражённым. Однако степень заражения воды быстро падает как вследствие распада радиоактивных веществ, так и в результате перемешивания зараженных слоев с незараженными слоями воды. Если подводный взрыв произошел вблизи суши, то прибрежная местность может оказаться зараженной радиоактивными веществами как в результате радиоактивного дождя, выпадающего из слоисто-кучевого облака, так и вследствие выбрасывания на берег радиоактивной воды.

Наиболее сильным радиоактивным заражением местности характеризуется подземный атомный взрыв. При этом взрыве большая часть радиоактивных продуктов взрыва смешивается с грунтом и может оседать на больших расстояниях от места взрыва.

На степень радиоактивного заражения местности могут значительное влияние оказать метеорологические условия. Дождь или снег, падающие через радиоактивное облако, могут ускорить осаждение радиоактивных веществ и тем самым усилить заражение. Приземный ветер, поднимая пыль с зараженной поверхности земли, может явиться причиной усиления заражения воздуха

в районе атомного взрыва, особенно если местность лишена растительного покрова, так как при этом происходит более сильное пылеобразование.

Как уже указывалось, радиоактивное заражение местности и воздуха может быть произведено не только в результате атомного взрыва, но и путем применения специально приготовленных боевых радиоактивных веществ (БРВ). Не исключена возможность применения БРВ в смеси с отравляющими веществами. Для приготовления БРВ могут найти применение бета-гамма-активные продукты деления урана 235. Они образуются в ядерных реакторах (котлах), которые используются для производства плутония.

Уменьшение активности БРВ во времени происходит медленно, поэтому при большой плотности заражения пребывание на такой местности может быть опасным в течение длительного времени.

2. Поражение людей на радиоактивно зараженной местности

Полевые дозиметрические измерения являются одним из основных мероприятий, проводимых для предупреждения от поражения людей, находящихся непосредственно на радиоактивно зараженной местности и за ее пределами, если они соприкасаются с зараженными предметами (вывезенная из района заражения боевая техника, снаряжение и т. д.). Поэтому эти измерения следует рассматривать в тесной связи с поражающим действием радиоактивных веществ.

Вредное биологическое действие радиоактивных веществ, как уже отмечалось, состоит в способности их излучений ионизировать атомы и молекулы, входящие в состав клетки живых тканей.

Поражение человека на радиоактивно зараженной местности возможно как в результате внешнего облучения, так и внутреннего, создаваемого радиоактивными веществами, попавшими внутрь организма (с воздухом, водой, пищей). Вследствие ионизирующего действия излучений в организме происходят сложные изменения, касающиеся в первую очередь системы кровообращения и центральной нервной системы.

При сильном внешнем облучении радиоактивными излучениями у человека может быть специфическое заболевание — лучевая болезнь. Лучевая болезнь развивается постепенно и протекает не у всех людей одинаково; наиболее стойки к заболеванию лучевой болезнью люди с хорошей физической закалкой. При легких заболеваниях отмечается тошнота, головные боли, головокружение, иногда незначительное и временное уменьшение количества белых кровяных шариков. В более тяжелых случаях усиливаются слабость, тошнота, рвота, головная боль, головокружение, уменьшается аппетит, появляется жажда, повышается температура, в составе крови резко уменьшается количество белых кровяных шариков, наблюдается временное выпадение волос, кровоточивость. Вследствие уменьшения количества белых кровяных шариков организм человека становится восприимчивым к инфекционным заболеваниям.

Особенно опасно попадание радиоактивных веществ внутрь организма, так как даже малые количества радиоактивных веществ (десятитысячные доли кюри), проникшие внутрь организма и поэтому подвергающие его длительному внутреннему облучению, могут вызвать серьезное лучевое заболевание.

При оказании своевременной медицинской помощи лучевая болезнь, как правило, заканчивается выздоровлением. Люди, подвергшиеся заболеванию, должны быть немедленно госпитализированы, чтобы обеспечить им покой и избежать инфекционных заболеваний. Для лечения больного проводится ряд терапевтических мероприятий: регулярное переливание крови, пока не восстановится ее состав; введение пенициллина и других антибиотиков для борьбы с инфекцией и т. д. В настоящее время ведется усиленное изучение лучевой болезни, и можно ожидать, что будут достигнуты большие успехи в разработке методов ее лечения.

В связи с двумя возможными путями поражения человека на радиоактивно зараженной местности проводится два вида дозиметрических измерений: рентгенометрические измерения — определение ионизирующего действия излучений, воздействующих на организм извне, и радиометрические измерения — определение количества (концентрации) радиоактивных веществ.

Если рентгенометрические измерения имеют основной целью предупредить поражение человека в результате внешнего облучения, то радиометрические измерения — предупредить попадание радиоактивных веществ внутрь организма или на открытые участки тела.

Остановимся более подробно на существе этих двух видов полевых дозиметрических измерений.

3. Полевые рентгенометрические измерения

Люди, находящиеся на радиоактивно зараженной местности вне укрытий, подвергаются непрерывному внешнему облучению радиоактивными

излучениями. Может ли человек в этом случае находиться на зараженной местности, не подвергаясь опасности? Да, может. Степень поражения организма ионизирующим действием излучений зависит прежде всего от величины дозы, то есть энергии излучения, поглощенной в одном кубическом сантиметре или в грамме тканей живого организма. Чем больше доза излучения, тем больше степень ионизации ткани и тем больше ее повреждение.

Однако человеческий организм обладает замечательным свойством восстановления поврежденных тканей, если они подверглись действию излучения, создавшему небольшие дозы. Следовательно, малые дозы радиоактивных излучений совершенно безвредны для здоровья человека, поэтому, если человек не подвергается сильному облучению, он может без ущерба своему здоровью находиться на зараженном участке местности.

Как нам уже известно, о степени ионизации живых тканей можно судить по степени ионизации воздуха, измеренной в рентгенах. Поэтому доза, выраженная в рентгенах, характеризует воздействие на человека радиоактивных излучений. Однако доза в рентгенах не является исчерпывающей характеристикой воздействия излучения на организм.

Степень поражения организма существенно зависит от времени, в течение которого создается доза излучения, а также от того, каким видом излучения создана эта доза.

Доза гамма-излучения в 400 рентген, полученная организмом в течение дня, является очень опасной; та же доза, полученная за несколько десятков лет, является совершенно безвредной.

Следовательно, опасность излучения характеризуется не только самой величиной дозы, а также и мощностью дозы, то есть величиной дозы, создаваемой в единицу времени. Мощность дозы, создаваемую излучениями на радиоактивно зараженной местности, принято называть уровнем радиации. Уровень радиации измеряется в рентгенах в час. Чем больше уровень радиации, тем более опасен зараженный участок для пребывания на нем незащищенных людей. Например, участок считается зараженным, если уровень радиации гамма-излучения достигает 0,1 рентген/час, сильно зараженным — более 5 рентген/час и опасно зараженным, если уровень радиации более 100 рентген/час.

В настоящее время принято считать, что допустимая доза при однократном облучении всего организма гамма-лучами равна 50 рентгенам. Отсюда следует, что на зараженном участке с уровнем радиации 0,1 рентген/час люди могут пребывать без какого-либо вреда для своего здоровья десятки суток. Однако, если уровень радиации гамма-излучения 100 рентген/час, время пребывания людей должно быть значительно меньше часа.

Приборы радиационной разведки, предназначенные для измерения уровней радиации, получили название рентгенометров. Рентгенометр — основной прибор радиационной разведки. Кроме рентгенометров, для проведения полевых рентгенометрических измерений используется еще один тип прибора — дозиметр[1]. Если рентгенометры служат для измерения уровня радиации, то дози-

[1] Не нужно путать название дозиметр с понятием дозиметрические приборы, которое включает в себя все типы приборов радиационной разведки.

метры предназначаются для измерения суммарной дозы, то есть дозы, полученной человеком или группой людей, находившихся в течение определенного промежутка времени на радиоактивно зараженной местности. Таким образом, с помощью дозиметров можно осуществить контроль за облучением личного состава, действующего на зараженной местности.

При получении предельно допустимой дозы человек должен быть изолирован от воздействия на него радиоактивных излучений. Поэтому контроль за облучением личного состава, проводимый с помощью дозиметров, позволяет предупредить поражение людей путем их своевременного удаления из зараженного района. При отсутствии дозиметров величина дозы может быть определена по показаниям рентгенометра, так как если уровень радиации постоянный, то

$$Д = p \cdot t, \tag{8}$$

где p — уровень радиации в рентгенах в час;
t — время пребывания на зараженной местности в часах.

При проведении рентгенометрических измерений важно знать, каким излучением создается уровень радиации или доза. Дело в том, что поражающее действие радиоактивных веществ зависит не только от ионизирующей способности их излучений, но и от проникающей способности, причем при внешнем облучении решающее значение имеет проникающая способность излучения.

Нам уже известно, что ионизирующая способность гамма-лучей в десятки раз меньше, чем у бета-лучей, и в тысячи раз меньше, чем у альфа-лучей. Однако с точки зрения поражения внешним облучением гамма-лучи наиболее опасны.

Это объясняется их большой проникающей способностью. Как уже отмечалось, продукты атомного взрыва являются сложной смесью бета- и бета-гамма-активных веществ. В состав этой смеси входят радиоактивные изотопы, испускающие гамма-кванты самых разнообразных энергий. В табл. 6 приведены бета-гамма-активные изотопы, наиболее часто встречающиеся в продуктах атомного взрыва.

Таблица 6

Наиболее распространенные бета-гамма-активные изотопы

Атомный номер	Название изотопа	Символ изотопа	Период полураспада	Энергия гамма-квантов, мэв
38	Стронций 91	Sr^{91}	9,7 часа	1,3
39	Иттрий 94	Y^{94}	20 мин.	Данные отсутствуют
40	Цирконий 95	Zr^{95}	65 дней	0,23; 0,73
42	Молибден 99	Mo^{99}	68 час.	0,3; 0,7
44	Рутений 103	Ru^{103}	45 дней	0,56
52	Теллур 132	Te^{132}	77 час.	0,22
53	Иод 131	J^{131}	8 дней	0,36
53	Иод 133	J^{133}	20,5 часа	0,55
53	Иод 134	J^{134}	54 мин.	1
53	Иод 135	J^{135}	6,7 часа	1,3
54	Ксенон 135	Xe^{135}	15,6 мин.	0,52
56	Барий 139	Ba^{139}	85 мин.	0,163; 1,05
56	Барий 140	Ba^{140}	12,7 дня	0,53
58	Церий 141	Ce^{141}	28 дней	0,15
58	Церий 143	Ce^{143}	33 часа	0,5
60	Неодим 147	Nd^{147}	11 дней	0,45
61	Прометий 149	Pm^{149}	55 час.	0,25
27	Кобальт 60	Co^{60}	5,0 лет	1,17; 1,33
11	Натрий 24	Na^{24}	15 час.	1,37; 2,76

Два последних в таблице изотопа — Na^{24} и Co^{60} — искусственные радиоактивные изотопы, образующиеся под воздействием потока нейтронов в момент взрыва. Натрий 24, как уже указывалось, образуется в поверхностном слое почвы, а кобальт 60 — в материале оболочки бомбы, в случае если она сделана из нерадиоактивного кобальта 59. Из этой таблицы можно заключить, что энергия испускаемых на радиоактивно зараженной местности гамма-квантов лежит в пределах от десятых долей мэв до одного мэв и более. Поэтому гамма-излучение на радиоактивно зараженной местности принято характеризовать некоторым средним значением энергии гамма-кванта, которое приблизительно равно 0,7 мэв.

В табл. 7 приведены величины слоев половинного ослабления, соответствующих энергии гамма-кванта $E_\gamma = 0,7$ мэв, для различных сред.

Таблица 7

Слои половинного ослабления гамма-излучения в различных средах для $E_\gamma = 0,7$ мэв

Вещество	Живые ткани	Воздух	Вода	Свинец	Грунт	Бетон
Слой половинного ослабления	10 *см*	70 *м*	8,8 *см*	0,66 *см*	6 *см*	4 *см*

Из анализа данных этой таблицы можно сделать следующие выводы:

1. Гамма-лучи, проходя через тело человека, ослабляются всего лишь в 3—4 раза, их проникание внутрь тела без особого ослабления может вы-

звать поражение жизненно важных органов человека.

2. Гамма-лучи слабо поглощаются воздухом, поэтому поражение человека возможно на значительных удалениях от поверхности зараженного участка, если он сильно заражен.

3. Создание индивидуальных средств защиты (специальные костюмы, накидки и т. д.) от внешнего облучения гамма-излучением исключено, так как даже слой свинца толщиной 0,66 см ослабляет интенсивность гамма-излучения всего лишь в два раза. Основным мероприятием, обеспечивающим предупреждение поражения людей этим излучением, является соблюдение норм времени пребывания на радиоактивно зараженной местности или использование укрытий с защитными толщами из грунта, бетона и т. д.

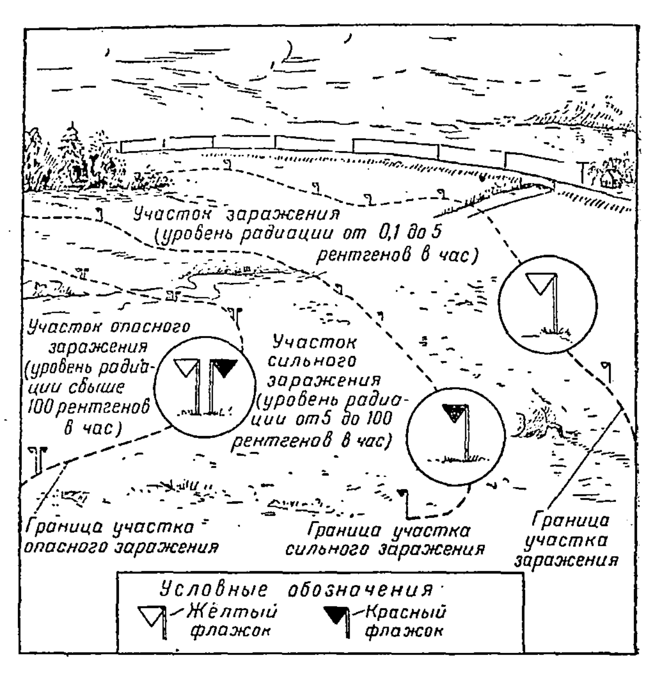
Альфа-лучи совершенно безопасны с точки зрения поражения внешним облучением, так как они полностью поглощаются слоем воздуха толщиной в несколько сантиметров и одеждой. Даже излучение альфа-активных веществ, находящихся непосредственно на открытых участках тела, не может вызвать серьезных поражений, так как альфа-частицы не способны проникнуть через роговой слой кожи. Поэтому рентгенометрические измерения альфа-лучей на радиоактивно зараженной местности не проводятся.

Пробег в воздухе бета-частиц, излучаемых радиоактивными продуктами взрыва и боевыми радиоактивными веществами, не превышает 10—15 м. Но и таким пробегом обладает незначительная часть бета-частиц. Бета-излучение очень сильно поглощается воздухом. Если поток бета-частиц на высоте 10 см над зараженной поверхностью принять за единицу, то на высоте ладо-

ней рук стоящего человека он будет ослаблен по крайней мере в 10 раз, а на высоте головы — более чем в 100 раз. Следовательно, наибольшему воздействию бета-частиц подвергаются ноги человека. Однако сапоги, надетые на ноги с портянкой из плотной ткани, практически полностью поглощают бета-излучение. Обмундирование и шинель также ослабляют бета-излучение. Поэтому ионизирующее действие бета-лучей при рентгенометрических измерениях учитывается только в том случае, если на высоте около метра мощность дозы бета-излучения в несколько раз превышает мощность дозы гамма-излучения. По этой же причине допустимые дозы бета-излучения во много раз больше допустимых доз гамма-излучения.

Таким образом, основным типом рентгенометрических измерений на радиоактивно зараженной местности является измерение мощности дозы (уровня радиации) и суммарной дозы, создаваемой гамма-излучением. Однако рентгенометры и дозиметры должны также позволять производить ориентировочную оценку мощности дозы, создаваемой бета-излучением.

С помощью рентгенометров радиационная разведка может быстро определить границы зараженных участков, пути обхода и направления преодоления сильно зараженных участков. Для обозначения границ зараженных участков используются предупредительные знаки, изображенные на рис. 35. Обозначаются границы участков с уровнем радиации гамма-излучения более 0,1 рентгена в час (граница зараженного участка), более 5 рентгенов в час (участок сильного заражения) и более 100 рентгенов в час (участок опасного заражения).



Предупредительные знаки					
Табельные			Подручные		
С уровнем радиации			С уровнем радиации		
более 0,1 рентгена в час	более 5 рентгенов в час	более 100 рентгенов в час	более 0,1 рентгена в час	более 5 рентгенов в час	более 100 рентгенов в час
30; 30; 30			5; 30; 30; Заражено!	Заражено! 5р.	Заражено! 100р
Флажки на металлических стержнях			Щиты из фанеры или досок		

Рис. 35. Обозначение на местности предупредительными знаками границ участков, зараженных радиоактивными веществами

При проведении рентгенометрических измерений следует иметь в виду, что величина уровня радиации зависит от времени, прошедшего после атомного взрыва, высоты измерения и наличия местных экранирующих предметов.

Величина уровня радиации пропорциональна плотности заражения, то есть количеству радиоактивного вещества, находящегося на единице площади зараженной поверхности. Как уже указывалось, количество радиоактивного вещества, а следовательно, и плотность заражения, сравнительно быстро уменьшается, так как большинство радиоактивных изотопов, входящих в состав продуктов атомного взрыва, имеют небольшой период полураспада (см. табл. 6). Поэтому величина уровня радиации относительно быстро уменьшается. Например, если уровень радиации через полчаса после взрыва принять за 1, то через час он составит 0,5, через 10 часов — 0,035, через 50 часов — 0,005. Это обстоятельство необходимо учитывать, когда рентгенометр используется для определения доз. Дело в том, что если уровень радиации переменный, формулой (8) для определения дозы пользоваться нельзя. В этом случае для определения дозы необходимо знать зависимость величины уровня радиации от времени, которую можно получить, если показания рентгенометра периодически фиксировать.

На рис. 36 показан график изменения уровня радиации гамма-излучения с высотой над поверхностью радиоактивно зараженного участка местности большого размера. Уровень радиации на высоте один метр условно принят равным единице. Из этого графика видно, что уровень радиации на высоте 1 м примерно в 1,5 раза меньше, чем на высоте 10 см. Особенно заметно изменяется

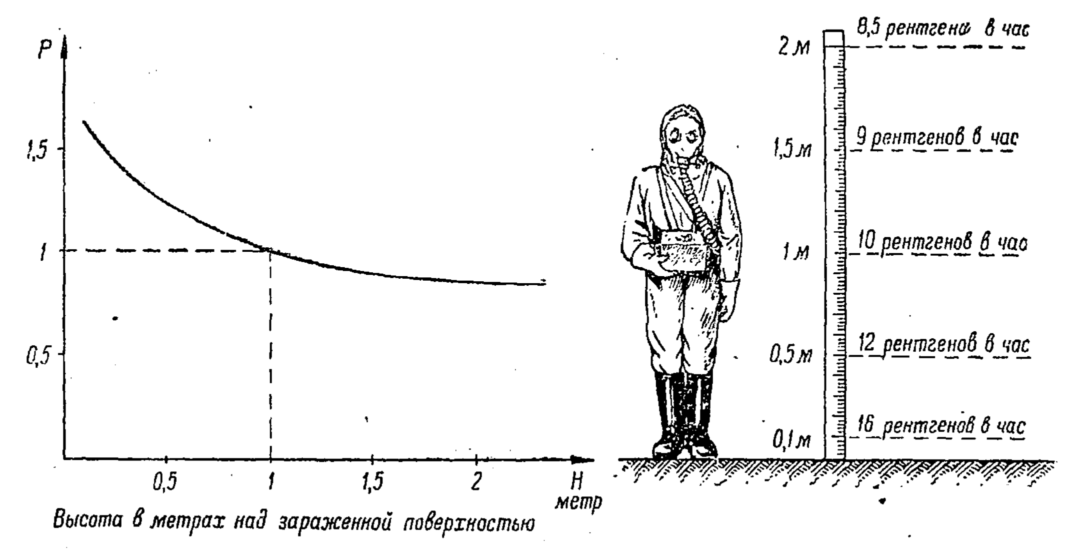


Рис. 36. Изменение величины уровня радиации гамма-излучения с высотой над поверхностью радиоактивно зараженного участка местности:

слева — график зависимости уровня радиации от высоты (уровень радиации на высоте один метр принят равным 1); справа — величины уровней радиации на различных высотах, в случае если уровень радиации на высоте 1 метр равен 10 рентген/час

величина уровня радиации гамма-излучения с высотой при малых размерах зараженного участка. Уровни радиации бета-излучения с изменением высоты от 0,1 м до 1 м уменьшаются значительно резче, чем это имеет место для гамма-излучения.

В связи с изменением уровня радиации с высотой радиационная разведка для общей оценки степени заражения участка производит измерение уровней радиации на определенной высоте, равной 0,5÷0,7 м. Иначе говоря, уровни радиации, указанные на предупредительных знаках, соответствуют высоте измерения 0,5÷0,7 м.

Местные экранирующие предметы также оказывают заметное влияние на величину уровня радиации. Например, в окопе уровень радиации меньше, чем на открытой местности, потому что стенки окопа заметно ослабляют излучение радиоактивных веществ, лежащих на открытой поверхности. Местные предметы: глыбы земли, камни, строения, также могут создавать ослабление уровней радиации. Все эти обстоятельства должны учитываться при проведении рентгенометрических измерений.

4. Полевые радиометрические измерения

На радиоактивно зараженной местности человек может быть поражен не только в результате внешнего облучения, но и при непосредственном попадании радиоактивных веществ на открытые участки тела или внутрь организма. Человек в этом случае также поражается в результате вредного биологического действия излучений. Попадание радиоактивных веществ внутрь организма может происходить при вдыхании радиоактивно

зараженного воздуха, при употреблении зараженных продуктов питания, воды, а также при непосредственном соприкосновении людей с зараженной техникой и другими предметами.

Нужно помнить, что радиоактивные вещества, распределенные по поверхности какого-либо предмета, могут быть совершенно безопасны с точки зрения внешнего облучения, но опасны при непосредственном соприкосновении человека с зараженной поверхностью, так как при этом всегда создается возможность попадания радиоактивных веществ внутрь организма. Поэтому боевая техника и другие зараженные предметы даже при удалении их с радиоактивно зараженной местности опасны для человека, если не приняты соответствующие меры предосторожности.

От попадания радиоактивных веществ внутрь организма и на открытые участки тела существуют простые и надежные способы защиты.

Противогаз полностью защищает от попадания радиоактивных веществ внутрь организма, а также от заражения ими кожных покровов лица и головы. Для защиты органов дыхания, если по каким-либо причинам отсутствует противогаз, могут быть использованы подручные средства: полотенце, носовой платок, вата, марля.

Защитный костюм, накидка, чулки, перчатки предохраняют от заражения радиоактивными веществами открытые участки тела, а также обмундирование, обувь и снаряжение.

Своевременное использование индивидуальных средств противохимической защиты в сочетании со строгим соблюдением правил поведения на радиоактивно зараженной местности, а также сани-

тарная обработка людей и дезактивация зараженной местности, вооружения, техники, обмундирования позволяют полностью устранить попадание радиоактивных веществ внутрь организма или поражение ими открытых участков тела.

Степень заражения радиоактивными веществами людей, воздуха, воды, техники, вооружения и других предметов оценивается по количеству радиоактивного вещества, находящегося на единице зараженной поверхности или соответственно в единице объема зараженного воздуха, воды. Чем больше радиоактивных веществ, тем больше степень заражения и тем больше возможность поражения людей радиоактивными веществами.

Мы уже знаем, что количество радиоактивного вещества измеряется не в единицах веса, а по его активности, то есть по числу распадающихся атомов за единицу времени. Нам также известно, что за единицу активности принята единица кюри. Однако кюри является очень большой единицей количества радиоактивного вещества, поэтому при полевых радиометрических измерениях количество радиоактивного вещества измеряется по числу распадов атомов этого вещества за одну минуту. В связи с этим степень заражения радиоактивным веществом поверхностей измеряется числом распадов атомов за одну минуту на одном квадратном сантиметре; жидкостей — числом распадов в кубическом сантиметре за одну минуту и воздуха — числом распадов в одном литре за одну минуту.

Приборы, предназначенные для определения степени зараженности радиоактивными веще-

ствами, получили название радиометров. Радиометры используются радиационной разведкой для определения степени и наличия заражения людей, грунта, воздуха, воды, продовольствия, обмундирования, вооружения и техники.

Отличие радиометрических измерений от рентгенометрических состоит не только в том, что в первом случае определяется степень заражения радиоактивными веществами, а во втором — ионизирующее действие излучений, но и в том, что при радиометрических измерениях имеют дело, как правило, с очень небольшим количеством радиоактивных веществ. Поэтому радиометры в отличие от рентгенометров являются более чувствительными приборами, которые можно использовать только вне мест сильного радиоактивного заражения. Определение же степени заражения грунта, поверхностей предметов, находящихся на радиоактивно зараженной местности, производится путем взятия проб с небольших участков зараженных поверхностей.

Если при внешнем облучении наиболее опасными являются гамма-активные вещества ввиду большой проникающей способности их излучений, то при попадании внутрь организма наиболее опасными являются вещества, излучающие альфа-частицы. Это объясняется огромной ионизирующей способностью альфа-лучей. Попадая внутрь организма, альфа-активные вещества ввиду небольшой проникающей способности их излучений могут вызвать лишь повреждение тех органов, вблизи которых они находятся. Однако действие этих веществ столь сильное, что даже местное поражение ими является чрезвычайно опасным. При одном и том же количестве попавших внутрь организма веществ наименее опасными являются

гамма-активные вещества, так как ионизирующая способность гамма-квантов ничтожно мала по сравнению с альфа-частицами и в сотни раз меньше, чем у бета-частиц.

Бета-активные вещества при попадании внутрь организма менее опасны, чем альфа-активные вещества, однако количество альфа-активных веществ в радиоактивных продуктах атомного взрыва[1] составляет ничтожную долю по сравнению с количеством бета-активных веществ. Поэтому практически основная опасность поражения человека на радиоактивно зараженной местности в результате попадания радиоактивных веществ внутрь организма или на открытые участки тела обусловливается бета-активными веществами. В связи с этим основным типом радиометрических измерений на радиоактивно зараженной местности являются измерения степени заражения бета-активными веществами.

Радиометры, предназначенные для определения степени заражения альфа-активными веществами, называются альфа-радиометрами, бета-активными веществами — бета-радиометрами. Первый тип прибора измеряет степень заражения альфа-активными веществами, выражаемую числом альфа-распадов в 1 минуту, второй тип прибора измеряет степень заражения бета-активными веществами числом бета-распадов в 1 минуту.

В табл. 8 и 9 приводятся краткие сводные характеристики рентгенометрических и радиометрических измерений.

---

[1] В боевых радиоактивных веществах альфа-активные вещества отсутствуют.

Таблица 8

Краткая сводная характеристика рентгенометрических измерений

Цель измерений: предупредить поражение людей в результате внешнего облучения

Измеряемые величины	Уровень радиации в рентгенах/час	Доза в рентгенах
Приборы, с помощью которых проводятся измерения	Рентгенометры	Дозиметры
Излучения, для которых производятся измерения	Гамма-, бета-излучение	Гамма-излучение
Основные измерения	По гамма-излучению	По гамма-излучению

Таблица 9

Краткая характеристика полевых радиометрических измерений

Цель измерений: предотвратить поражение людей в результате попадания радиоактивных веществ внутрь организма или на открытые участки тела

Измеряемая величина	Степень заражения
Виды радиоактивных веществ, для которых проводятся измерения	Бета-, альфа-, гамма-активные вещества
Единицы степени заражения	Число бета-, альфа-распадов на единице поверхности или в единице объема за одну минуту
Тип используемых приборов	Бета-, альфа-радиометры

V. ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

1. Рентгенометр

Как уже указывалось, рентгенометры предназначены для измерения уровней гамма-излучения и служат для установления зон сильного и опасного заражения, что позволяет предупредить поражение личного состава войск, действующих на зараженной местности.

Уровни излучения измеряются в рентгенах в час, поэтому шкала прибора градуируется в таких же единицах. Диапазон прибора должен быть достаточно широким, чтобы можно было измерять уровни радиации от десятых или даже сотых долей рентгена в час до нескольких сотен рентгенов в час.

В качестве воспринимающего устройства в рентгенометре обычно применяется ионизационная камера, принцип работы которой был описан выше. В этом случае прибор должен состоять из следующих основных частей (блоков):

— ионизационная камера;

— усилитель постоянного тока (ионизационного тока камеры);

— регистрирующий электроизмерительный прибор;

— источники питания для усилителя и ионизационной камеры.

Принцип действия рентгенометра заключается в следующем.

Ионизационный ток, возникающий в камере под действием радиоактивного излучения, усиливается ламповым усилителем и регистрируется микроамперметром. Отклонение стрелки микроамперметра пропорционально уровню радиации, что позволяет шкалу его проградуировать прямо в рентгенах в час. Питание лампового усилителя и ионизационной камеры осуществляется обычно от сухих элементов и батарей.

Применение лампового усилителя необходимо потому, что ионизационные токи, протекающие в камере при воздействии на нее излучения, очень малы по величине и непосредственно измерять их весьма трудно. Эти токи имеют величину порядка 10^{-11}—10^{-7} ампера (0,0001—0,1 микроампера), в то время как обычные микроамперметры позволяют измерять токи, начиная с одного микроампера.

В качестве усилителя используется ламповая схема, собранная на так называемой электрометрической лампе. На рис. 37 приведена принципиальная схема рентгенометра.

Ионизационный ток камеры $i_к$, протекая по сопротивлению R, создает на нем падение напряжения, которое подается на управляющую (вторую) сетку электрометрической лампы. При достаточно большой величине сопротивления R это напряжение на сетке вызовет значительное изменение анодного тока лампы, которое и будет отмечено микроамперметром M.

При использовании в схеме рис. 37 электрометрической лампы с крутизной характеристики $50 \frac{\text{мка}}{\text{вольт}}$ для изменения анодного тока на

50 микроампер на ее сетку необходимо подать напряжение около 1 вольта. При ионизационном токе 10^{-11} ампер такое напряжение будет создаваться на сопротивлении 100 000 мегом (10^{11} ом).

Совершенно понятно, что если в цепи сетки лампы включено такое сопротивление и по нему проходит ток порядка 10^{-11} ампер, собственный ток сетки лампы должен быть много меньше

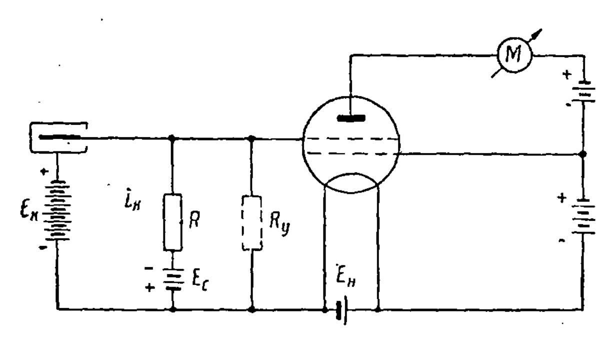


Рис. 37. Принципиальная электрическая схема рентгенометра

этой величины, иначе он создаст на сопротивлении дополнительное напряжение и измерения силы ионизационного тока будут неправильными. Кроме того, величина сопротивления утечки между сеточным выводом и катодом лампы $R_у$ (по баллону лампы и ламповой панели) должна быть много больше, чем сопротивление R, так как это сопротивление утечки подключено параллельно сопротивлению R и уменьшает напряжение на сетке за счет прохождения по нему ионизационного тока (см. рис. 37).

Этим двум требованиям — малый сеточный ток и большое сопротивление утечки — удовлетво-

ряют электрометрические лампы и не удовлетворяют обычные усилительные лампы. Выполнение этих требований, помимо некоторого изменения конструкции самой лампы, достигается тем, что электрометрическая лампа работает в особом режиме — при малом токе накала катода и низком анодном напряжении (6—8 вольт).

Как видно из схемы рис. 37, на первую сетку лампы, самую близкую к катоду, подается положительное напряжение порядка нескольких

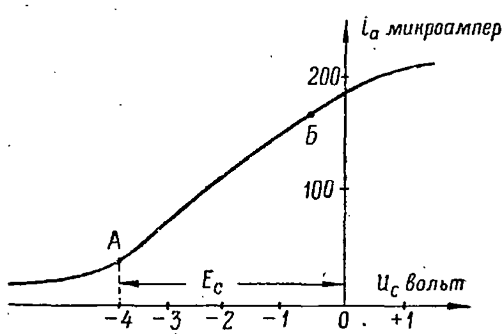


Рис. 38. Сеточная характеристика лампы

вольт, вторая сетка является управляющей. Положительное напряжение на первой сетке лампы позволяет получить достаточный анодный ток при малом анодном напряжении. Кроме того, положительный потенциал первой сетки препятствует проникновению положительных ионов на управляющую сетку из области, близкой к катоду, что уменьшает сеточный ток.

На рис. 38 приведена зависимость анодного тока электрометрической лампы от напряжения на управляющей сетке (характеристика лампы). Эта зависимость в некоторых пределах сеточного

напряжения имеет прямолинейный характер, то есть определенному изменению напряжения на сетке в любой точке этого участка характеристики соответствует одно и то же изменение анодного тока.

В приведенной на рис. 37 схеме на сетку лампы подано от батареи смещение E_c около 4 вольт, что соответствует точке A на характеристике лампы. Если ионизационную камеру подвергнуть облучению, потечет ионизационный ток,

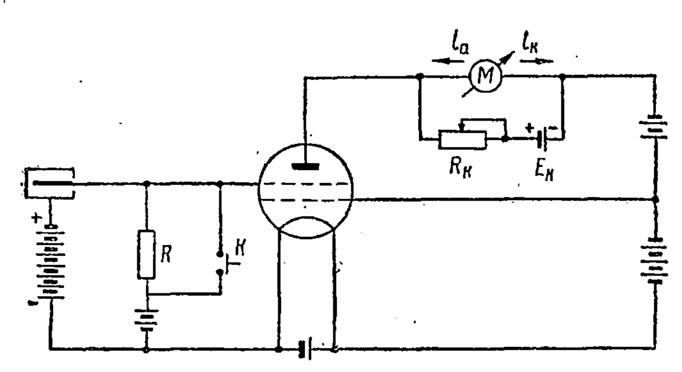


Рис. 39. Схема усилителя с компенсацией начального анодного тока

который вызовет падение напряжения на сопротивлении R так, что смещение на сетке лампы уменьшится и анодный ток ее возрастет. Вследствие прямолинейности характеристики лампы изменение анодного тока будет пропорционально мощности дозы излучения.

Однако включить микроамперметр так, как показано на рис. 37, нельзя вследствие наличия анодного тока при начальном напряжении смещения на сетке лампы (точка A на рис. 38).

Этот ток имеет значительную величину и будет отмечен прибором.

Для исключения влияния начального тока на показания прибора применяется схема компенсации (рис. 39).

Параллельно с микроамперметром M включено переменное сопротивление $R_к$ и элемент $E_к$ с напряжением $1 \div 2$ вольта. Элемент $E_к$ включен так, что ток от него в цепи микроамперметра протекает в направлении, обратном анодному току лампы. Регулируя сопротивление $R_к$, можно добиться полной компенсации начального анодного тока, в результате чего общий ток в цепи микроамперметра будет равен нулю. При уменьшении смещения на сетке лампы вследствие протекания ионизационного тока по сопротивлению R анодный ток возрастет и будет отмечен микроамперметром.

Величина начального анодного тока может меняться при изменении напряжения батареи накала или анода. Поэтому ручка сопротивления $R_к$ обычно выводится на переднюю панель прибора и установка нуля производится периодически в процессе измерений уровня радиации.

Для того, чтобы установку нуля можно было производить и в зараженной зоне, когда на камеру воздействует излучение и в ее цепи течет ионизационный ток, вводится контакт K (см. рис. 39), при нажатии которого замыкается накоротко сопротивление R и поэтому ионизационный ток не создаст на нем падение напряжения. Управление этим контактом также выводится на переднюю панель прибора. При замкнутом контакте, регулируя сопротивление $R_к$, производится установка стрелки прибора на нуль, после чего контакт размыкается и отклонение стрелки будет

пропорционально уровню радиации в месте измерения.

Иногда вместо контакта *К* вводится дополнительное положение переключателя *П*, при котором производится проверка установки нуля прибора (см. рис. 40).

Как уже указывалось выше, полевой рентгенометр должен иметь диапазон измерений уровней

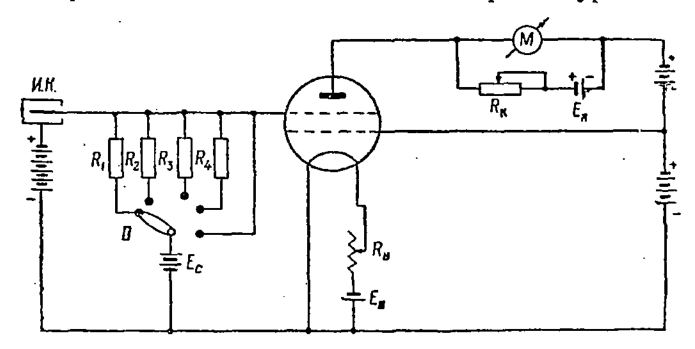


Рис. 40. Схема рентгенометра с переключением входных сопротивлений

радиации от сотых долей рентгена в час до нескольких сотен рентгенов в час, то есть, иначе говоря, прибор должен обеспечивать измерение уровней радиации, меняющихся более чем в 10 000 раз. Естественно, что для получения удовлетворительной точности отсчета показаний регистрирующего прибора такой большой диапазон измерений необходимо разбить на несколько поддиапазонов. Например, первый поддиапазон — от 0,01 до 0,1 рентген/час, второй — от 0,1 до 1 рентген/час и т. д. Смену поддиапазонов можно осуществить путем замены ионизационных камер: при измерении малых уровней радиации приме-

нять камеры большого объема; если уровень радиации возрастает и стрелка прибора ушла за пределы шкалы, следует поставить камеру меньшего объема. Нетрудно видеть, что при таком методе смены поддиапазонов переход от одного предела измерений к другому осуществляется за счет изменения величины ионизационного тока. Однако такой способ весьма неудобен и в полевых условиях не может быть использован.

Более пригодным является метод ступенчатого изменения величины сопротивления R, как показано, например, на рис. 40. При таком методе изменения пределов измерения в цепь сетки лампы поочередно включаются сопротивления, величина которых тем меньше, чем больший уровень радиации необходимо измерить. Наиболее удобно изменять пределы измерений кратно 10. Тогда, если самый чувствительный поддиапазон считать первым, при переходе на второй поддиапазон величина сопротивления должна быть уменьшена в 10 раз, при переходе на третий — в 100 раз и т. д.

Переход с одного поддиапазона на другой осуществляется при помощи переключателя поддиапазонов *П* (см. рис. 40), ручка которого выводится на переднюю панель рентгенометра.

На схеме рис. 40 в цепь накала, помимо элемента $E_н$, включен реостат накала $R_н$. При помощи этого реостата устанавливается номинальное напряжение, при котором обеспечивается нормальный режим работы электрометрической лампы. Контроль за правильной установкой напряжения накала может производиться по прибору *М*, который для этой цели переключается особым переключателем в цепь накала лампы. На шкале прибора обычно ставится риска, при

совмещении с которой стрелки прибора напряжение накала будет равно номинальному.

Рассмотренная выше схема рентгенометра с ионизационной камерой является наиболее типичной и содержит все основные узлы, которые характерны для приборов такого типа.

В настоящее время разработано много схем, имеющих те или иные отличия от приведенной выше. Наибольший интерес среди них представляет схема с использованием электрометрической лампы типа триод (то есть имеющей катод, анод и одну сетку). Триод имеет достаточно малый сеточный ток. Применение такой лампы позволяет сконструировать прибор, который при изменении напряжения источников питания (накала и анода) на 25—30% имеет малую погрешность измерений. Это позволяет отказаться от регулировки напряжения накала и значительно увеличивает срок службы источников питания, упрощая тем самым эксплуатацию прибора.

Конструкция рентгенометра обычно представляет собой один блок, размещенный в железном или алюминиевом кожухе. Все ручки управления и регистрирующий прибор размещаются на верхней панели, которая называется передней панелью рентгенометра.

Схема прибора очень чувствительна к влаге, так как попадание влаги на электрометрическую лампу, входные сопротивления и вывод внутреннего электрода ионизационной камеры уменьшает сопротивление этих цепей, что нарушает градуировку и выводит прибор из строя. Поэтому входная цепь усилителя тока (сопротивления нагрузки и переключатель поддиапазонов), а также электрометрическая лампа монтируются обычно в отдельном отсеке, который тщательно гермети-

зируется. Как правило, ионизационная камера и весь монтаж рентгенометра крепятся к внутренней стороне передней панели и составляют с ней одно целое. Второй частью прибора является кожух с отдельным отсеком для размещения источников питания. Если прибор предназначен не только для измерения уровней радиации гамма-излучения, но и бета-излучения, — в дне кожуха должно быть окно, через которое бета-частицы могли бы проникать внутрь камеры. При измерении уровней радиации гамма-излучений это окно закрывается крышкой и доступ бета-частиц в камеру прекращается.

При измерениях уровней радиации прибор обычно помещается на высоте 0,5—0,7 метра от поверхности почвы, которой соответствует средняя величина мощности дозы для стоящего на зараженной местности человека.

При подходе к зараженной зоне прибор включается на самый чувствительный поддиапазон и отмечаются его показания. При увеличении уровней радиации производится последовательное переключение на более грубые поддиапазоны.

После выхода из зараженной зоны необходимо выключить рентгенометр для экономии источников питания. Если условия работы позволяют, то желательно выключать прибор и в промежутках между измерениями в зараженной зоне.

Оператор должен вести учет времени, в течение которого прибор находится во включенном состоянии. Это необходимо для того, чтобы можно было своевременно производить замену источников питания и тем самым быть уверенным в том, что во время работы прибор не выйдет из строя.

Батарея, от которой подается напряжение на ионизационную камеру, практически не расходует

энергии, так как ток через камеру очень мал и значительно меньше токов саморазряда самой батареи. Поэтому батарея обеспечивает питание камеры в течение всего срока ее хранения. Следует иметь в виду, что при малых мощностях доз, порядка единиц рентген/час, прибор может давать правильные показания, даже если эта батарея не менялась очень долгое время и имеет напряжение меньше половины номинального значения ее э. д. с. В частности, при проверке работоспособности и градуировки прибора на самом чувствительном поддиапазоне показания его с такой батареей будут правильными. Однако при измерении больших мощностей доз (несколько десятков рентген/час) прибор будет в этом случае значительно (до двух и более раз) занижать показания. Занижение показаний объясняется тем, что при больших уровнях радиации и пониженных напряжениях не обеспечивается режим тока насыщения в камере. Поэтому на своевременную замену батареи питания камеры и периодическую проверку ее годности путем измерения напряжения, которое она дает, необходимо обращать серьезное внимание.

Тщательное соблюдение правил эксплуатации обеспечит длительную бесперебойную работу прибора. В случае обнаружения каких-либо неисправностей оператор должен прежде всего проверить источники питания. Если источники питания исправны, а прибор не работает, его необходимо отправить в ремонтную мастерскую.

После ремонта должна быть произведена проверка градуировки прибора от эталонного радиоактивного источника. Кроме того, желательно периодически проверять его градуировку один раз в 3—4 месяца.

Эталонным источником может быть, например, радиоактивный кобальт (Co^{60}), активность которого приведена в паспорте с указанием времени измерения (месяц, число, год). Расчет мощности дозы на различных расстояниях от кобальтового источника производится по формуле:

$$P = \frac{1{,}35 \cdot Q}{R^2}, \quad (9)$$

где P — мощность дозы в рентгенах в час;
Q — активность источника в кюри;
R — расстояние от источника в метрах.

С течением времени активность кобальтового источника уменьшается за счет распада радиоактивных атомных ядер, причем за пять лет активность падает в два раза. Поэтому если с момента паспортизации источника прошло длительное время, необходимо в величину его активности вносить поправку, величина которой приведена в табл. 10.

Таблица 10

Время, прошедшее после эталонирования источника (в месяцах)	Коэффициент K, на который необходимо умножить активность источника
4	0,95
8	0,91
12 (1 год)	0,87
16	0,83
20	0,79
24 (2 года)	0,76
28	0,73
32	0,69
36 (3 года)	0,66
40	0,63
44	0,60
48 (4 года)	0,57
52	0,55
56	0,52
60 (5 лет)	0.50

С учетом поправки на радиоактивный распад мощность дозы от кобальтового источника рассчитывается по формуле:

$$P = \frac{1{,}35 \cdot K \cdot Q}{R^2},$$

где Q — активность источника по паспорту в кюри;

K — коэффициент из табл. 10;

R — расстояние от источника в метрах.

При градуировке обычно проверяется соответствие показаний прибора истинной мощности дозы в трех точках шкалы: в начале, середине и конце каждого поддиапазона. Расстояние от источника, которому соответствует заданная мощность дозы P, находится по формуле:

$$R = \sqrt{\frac{1{,}35 \cdot K \cdot Q}{P}}.$$

Если $P = 0{,}3$ рентгена в час, то

$$R = \sqrt{\frac{1{,}35 \cdot K \cdot Q}{0{,}3}} = 2{,}1 \sqrt{K \cdot Q} \text{ метров.}$$

Прибор устанавливается дном к источнику так, чтобы расстояние от источника до центра ионизационной камеры было равно R. Расположение центра камеры обычно отмечается на кожухе прибора знаком +, от которого и отсчитывается расстояние до источника.

Если показания прибора не совпадают с рассчитанной величиной мощности дозы, производится регулировка чувствительности прибора до получения такого совпадения. Такая регулировка производится обычно на самом чувствительном поддиапазоне в середине шкалы. Затем производится проверка при других мощностях дозы на

этом же поддиапазоне (начало и конец шкалы), а также на других поддиапазонах. Градуировка прибора считается правильной, если отклонения показаний прибора от расчетной мощности дозы не превосходят погрешности, допустимой согласно инструкции к прибору.

Следует иметь в виду, что при градуировке рентгенометр нельзя размещать от источника на расстоянии ближе 30÷40 см, так как в этом случае расчетная мощность дозы не будет совпадать со средней мощностью дозы для всего объема камеры. Это условие накладывает ограничение на наименьшую величину активности источника. Так, для получения мощности дозы 3 рентгена в час на расстоянии 30 см от источника его активность должна быть

$$K \cdot Q = \frac{P \cdot R^2}{1{,}35} = \frac{3 \cdot 0{,}3^2}{1{,}35} = 0{,}2 \text{ кюри.}$$

Для проверки прибора при мощности дозы 30 рентген/час активность источника должна быть не менее 2 кюри.

При проведении градуировочных работ с большим количеством приборов необходимо строго следить за соблюдением правил безопасности при работе с радиоактивными источниками и вести строгий учет доз, полученных личным составом, проводившим градуировку.

2. Дозиметры индивидуального пользования

Дозиметры предназначены для измерения доз, полученных личным составом за время пребывания в зараженной зоне. Дозиметры индивидуального пользования позволяют достаточно точно определить дозу, полученную отдельным

человеком при нахождении его на радиоактивно зараженных участках местности с различными уровнями радиации. Знание доз особенно важно при проведении систематических работ в зараженной зоне.

Доза гамма-излучения должна измеряться в рентгенах. Поэтому шкалу дозиметра следует градуировать в таких же единицах.

В качестве воспринимающего элемента в дозиметре может быть применена фотопленка. Как уже нам известно, пленка под воздействием излучения после проявления темнеет, причем степень потемнения пропорциональна дозе излучения. При помощи этого свойства, можно после предварительной градуировки использовать пленку в качестве индивидуального дозиметра. Этот метод находит широкое применение во всех лабораториях, где ведутся работы с радиоактивными веществами. Однако в полевых условиях применение его затруднено вследствие необходимости иметь фотолабораторию для обработки пленки.

Более приемлемым для полевых условий является метод измерения доз с помощью малогабаритных ионизационных камер с «воздухоэквивалентными» стенками. Сущность метода заключается в следующем.

Если к ионизационной камере, имеющей емкость $C_к$, подключить на короткое время батарею с напряжением U, то камера получит заряд Q, равный:

$$Q = C_к \cdot U.$$

При воздействии на такую камеру гамма-излучения в ее рабочем объеме образуются ионы, которые движутся к заряженным электродам камеры, уменьшая их заряд. Уменьшение заряда,

а следовательно, и уменьшение напряжения на камере, будет тем больше, чем больше образовалось ионов, то есть чем больше доза излучения в месте нахождения камеры. Измеряя оставшееся на камере напряжение, можно судить о дозе, полученной камерой.

Путем подбора размеров камеры, величины емкости и зарядного напряжения можно сконструировать камеры, которые позволяли бы измерять дозы от десятых долей рентгена до ста и больше рентгенов. Камеры первого типа находят применение в условиях длительной и систематической (в течение нескольких лет) работы с радиоактивными излучениями, когда допустимая доза за рабочий день составляет около 0,05 рентгена. Камеры второго типа могут найти применение в случае кратковременного облучения, когда можно допустить однократное облучение дозой 50, а иногда и более рентген.

Для войск могут найти применение камеры, позволяющие измерять дозы до нескольких десятков рентген. Но в то же время должны быть камеры и на малые дозы, необходимые для контроля за облучением личного состава при систематической работе в зараженной зоне.

С целью повышения удобства пользования такой камерой она выполняется в форме авторучки и носится в кармане гимнастерки. На рис. 41 показан разрез одной из возможных конструкций камеры. Ее цилиндрический корпус *3* изготовлен из алюминия и является внешним электродом камеры. Внутренним электродом является штырь *2*, служащий одним из выводов конденсатора *1*. Второй вывод конденсатора через переходную втулку *5* соединен с внешним электродом. Камера с обоих концов закрыта навинчивающимися

пластмассовыми колпачками *4*. Для крепления ее в кармане имеется пружинка *7*.

Для заряда камеры необходимо вывернуть левый колпачок *4*, подключить один из полюсов батареи к корпусу, а второй через металлический контакт в упругой диафрагме *6* — к торцу внутреннего электрода *2*. Диафрагма *6* установлена для обеспечения герметизации камеры.

К изолятору конденсатора *1* предъявляются очень высокие требования. Утечка заряда по изо-

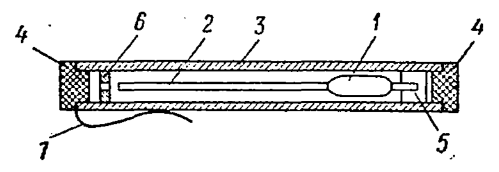


Рис. 41. Устройство индивидуального дозиметра

лятору будет также уменьшать напряжение на конденсаторе, как и воздействие излучения, что может привести к большим погрешностям в измерении дозы. Поэтому одним из основных требований, предъявляемых к камере, является небольшая утечка заряда, или, как принято говорить, небольшой саморазряд ее, в основном определяемый саморазрядом конденсатора.

Зарядку камеры осуществить сравнительно несложно, достаточно иметь только батарею с необходимым напряжением и вольтметр, который позволял бы контролировать зарядку камеры до одного и того же напряжения. Значительно труднее измерить остаточное напряжение на камере после ее облучения. Обычные измерительные приборы для этой цели непригодны, так как они имеют сравнительно небольшое сопротивление,

через которое заряд быстро стечет и измерить ничего не удастся.

Очень большим сопротивлением обладает промежуток сетка — катод электрометрической лампы. В то же время, как это было показано в параграфе «Рентгенометр», изменение напряжения на сетке этой лампы может быть отмечено микроамперметром, включенным в ее анодную цепь. Однако напряжение на сетке можно менять практически в пределах нескольких вольт, в то время как напряжение на камере после облучения может измениться значительно больше (на 100 вольт и более). Из этого затруднения имеется следующий выход: если в момент измерения к конденсатору ионизационной камеры подключить параллельно конденсатор значительно бо̀льшей емкости (например, в 99 раз больше), то вследствие перераспределения заряда между емкостями напряжение на этих конденсаторах будет в 100 раз меньше, чем было напряжение на камере.

Если в результате облучения напряжение на камере упало с 200 до 40 вольт, то есть на 160 вольт, то при подключении указанного выше конденсатора изменение напряжения будет в 100 раз меньше, то есть всего на 1,6 вольта. Такое изменение напряжения может быть легко измерено при помощи электрометрической лампы.

Схема измерительного пульта, построенного по такому принципу, показана на рис. 42. В цепь сетки электрометрической лампы постоянно включен конденсатор C, емкость которого примерно в 100 раз больше емкости конденсатора камеры $C_к$. В гнезда «изм» вставляется облученная камера. Шкала микроамперметра градуируется так, что если камера не подверглась воздействию

излучения и заряд ее полностью сохранился, при вставлении ее в гнездо «изм» отрицательное напряжение на сетке лампы увеличивается, анодный ток падает и стрелка микроамперметра устанавливается на нуль. При облучении камеры большой дозой (скажем, 50 рентген) на ее электродах останется незначительное напряжение и при вставлении ее в гнездо «изм» стрелка микроам-

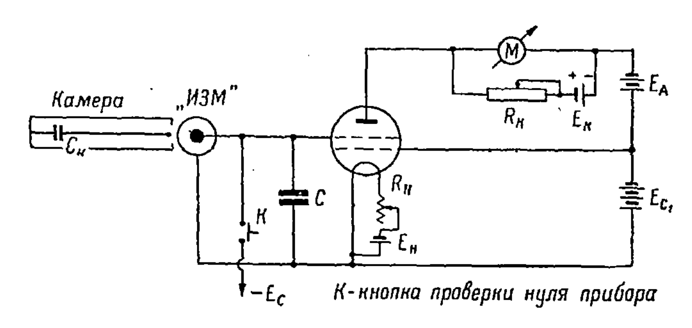


Рис. 42. Принципиальная схема измерительного пульта

перметра значительно отклонится от нулевого положения. Если заранее провести измерение напряжения на камерах после облучения их известными дозами, шкала микроамперметра может быть проградуирована прямо в рентгенах.

Разобранный выше метод измерения доз позволяет одну камеру использовать на несколько пределов измерения. Если камеру, о которой говорилось выше, зарядить до напряжения 20 вольт (вместо 200 вольт) и к сетке электрометрической лампы подключить емкость, которая была бы всего в 9 раз больше емкости камеры $C_к$, то предельная доза в этом случае будет в 10 раз меньше, чем раньше.

Однако этот метод не является единственным. В последнее время для измерения напряжения между электродами камеры широкое применение находят простейшие электрометры. Такой электрометр представляет собой очень тонкую металлизированную кварцевую нить (толщиною в тысячные доли сантиметра), подвешенную на металлическом держателе. Если на такую систему подать электрический заряд, нить под влиянием сил электрического отталкивания отклонится от

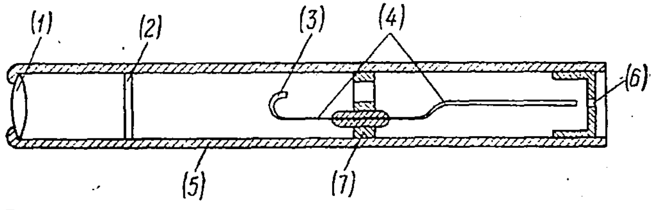


Рис. 43. Устройство прямопоказывающего индивидуального дозиметра

держателя. Величина отклонения будет пропорциональна величине заряда. Под воздействием излучения величина заряда уменьшится и нить будет отклоняться от своего первоначального положения. Применив оптическую систему для наблюдения за нитью и ее смещением, можно после предварительной градуировки измерять дозы, полученные камерой.

Размеры такого электрометра настолько малы, что он вместе с оптической системой может быть вмонтирован прямо в камеру и полученную дозу можно наблюдать в любой момент без использования пульта. Такие камеры называются прямопоказывающими. На рис. 43 схематически показано устройство прямопоказывающего дози-

метра. Камера состоит из оптической системы *1*, сетки со шкалой для измерения отклонения нити *2*, электроскопа с кварцевой нитью *3*, внутреннего электрода *4*, внешнего электрода *5*, мембраны для зарядки *6* и изолятора *7*.

Сделаем несколько замечаний по поводу правил пользования индивидуальными дозиметрами.

Зарядку камер и выдачу их желательно производить перед самым выходом человека в район зараженного участка. При нахождении в зараженной зоне камера должна храниться в нагрудном кармане гимнастерки.

После работы камера сдается оператору, который производит измерение полученной дозы на зарядно-измерительном пульте.

Обращаться с камерами необходимо осторожно, не допускать резких ударов, падения на пол или землю во избежание механических повреждений. По возможности нужно оберегать их от воздействия влаги и дождя. Следует иметь в виду, что попадание влаги внутрь камеры может привести к увеличению ее саморазряда, что практически выводит камеру из строя.

Все камеры комплекта должны систематически проверяться на величину саморазряда. Проверка делается следующим образом. Камера заряжается и ставится на хранение в месте, где отсутствуют излучения. После хранения в течение одних суток производится измерение на пульте. Хорошая камера должна иметь саморазряд не более 5% за сутки. Например, у камеры на 5 рентген после ее хранения в течение суток показания за счет саморазряда не должны превышать 0,2—0,25 рентгена. Если саморазряд превышает эту величину, камеру, выдавать на руки не рекомендуется и ее следует отдать

в ремонтную мастерскую для устранения саморазряда.

После ремонта камер или пульта необходимо проверять градуировку путем облучения камер известной дозой гамма-излучения, например, от кобальтового источника. С этой целью производится расчет мощности дозы на выбранном расстоянии (порядка 50—80 см) от эталонного источника по формуле (9). Камеры устанавливаются на этом расстоянии и облучаются заданное время так, чтобы доза, равная произведению мощности дозы на время облучения, была равна выбранной величине. Например, камера на 5 рентген должна облучаться дозой около 3—4 рентген. Если мощность дозы равна 1 рентгену в час, камера должна облучаться 3—4 часа. После облучения производится измерение на пульте и определяется правильность градуировки камеры.

Для проверки пульта необходимо облучить некоторое количество камер (15—20 штук) различными дозами так, чтобы была охвачена вся шкала пульта. Для камер на 5 рентген дозы должны быть примерно 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5 рентген. При мощности дозы 1 рентген в час на облучение ставятся одновременно не менее 16 камер, после чего последовательно снимаются по 2 камеры через 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4 и 5 часов. После измерения этих камер на пульте можно судить о правильности его показаний по всей шкале измерительного прибора.

3. Радиометр

В качестве воспринимающего устройства радиометра в настоящее время используются газовые счетчики. Количество бета-частиц, испускае-

мых с исследуемой зараженной поверхности за одну минуту, пропорционально степени ее заражения, то есть числу бета-распадов за одну минуту с одного квадратного сантиметра. Как известно, практически каждая бета-частица, проникающая в газовый счетчик, вызывает в его цепи импульс тока. Поэтому количество импульсов тока в цепи счетчика за одну минуту пропорционально степени заражения поверхности, над которой помещен счетчик.

Для определения числа импульсов тока за одну минуту, а следовательно, и степени радиоактивного заражения поверхности в полевых радиометрах, эти импульсы преобразуются в постоянный ток, сила которого пропорциональна числу импульсов за одну минуту. Величина силы тока определится с помощью электроизмерительного прибора, шкала которого проградуирована в распадах/минут с одного квадратного сантиметра.

Радиометр, построенный по такому принципу, состоит из:

— газового счетчика;
— формирующего каскада;
— усредняющего (интегрирующего) контура;
— источников питания.

Принцип работы радиометра состоит в следующем.

Импульсы напряжения от газового счетчика подаются на формирующий каскад, на выходе которого все они имеют практически одинаковую амплитуду и форму.

Далее импульсы поступают на интегрирующий контур, построенный так, что выходное напряжение на нем пропорционально числу импульсов в единицу времени. Это напряжение подается на ламповый вольтметр, отклонение стрелки кото-

рого будет пропорционально числу импульсов в минуту, то есть в конечном счете степени заражения поверхности, или продовольствия, или обмундирования и т. д.

Разберем подробнее работу каждого каскада. Напряжение питания на счетчик подается через сопротивление нагрузки, как показано на схеме рис. 44.

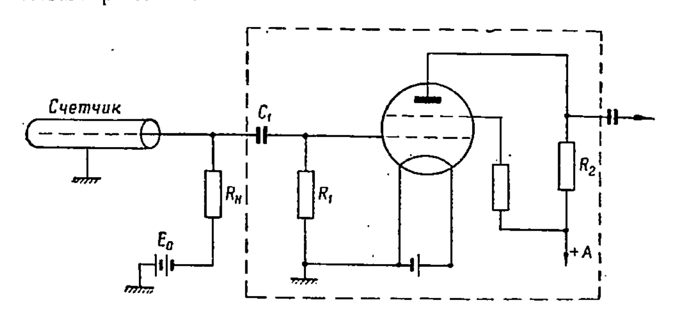


Рис. 44. Схема формирующего каскада

При отсутствии излучений ток в цепи счетчика не проходит и напряжение между нитью и катодом счетчика равно напряжению источника питания E_0. Как только в счетчик попадает бета-частица, возникает разряд, в цепи счетчика проходит импульс тока, который создает падение напряжения на сопротивлении $R_н$. Этот импульс имеет крутой передний фронт (напряжение нарастает очень быстро) и более пологий задний фронт (спадание напряжения происходит значительно медленнее). Форма импульса напряжения показана на рис. 45, *а*. Импульс имеет отрицательный знак, так как прохождение тока через счетчик вызывает уменьшение напряжения на его нити. Импульсы напряжения, поступающие

с выхода газового счетчика, не постоянны по амплитуде при изменении скорости счета. Например, при увеличении скорости счета рабочее напряже-

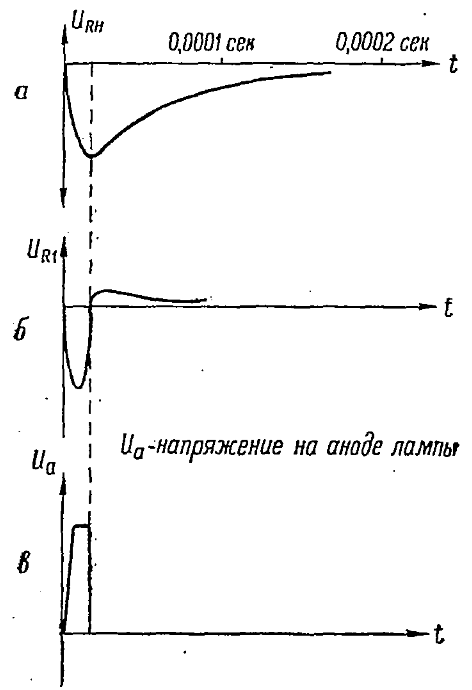


Рис. 45. Форма импульсов в цепи счетчика (*а*), в цепи сетки (*б*) и анода лампы (*в*) формирующего каскада

ние на счетчике несколько уменьшается за счет падения напряжения на сопротивлении $R_н$ (рис. 44). Это в свою очередь приводит к уменьшению амплитуды импульсов, которая пропорцио-

нальна величине напряжения на счетчике. Таким образом, амплитуда импульсов зависит от величины потока бета-частиц. В то же время для нормальной работы интегрирующего контура необходимо иметь импульсы, строго одинаковые по амплитуде.

Для получения таких импульсов служит формирующий каскад, схема которого приведена на рис. 44 (обведена пунктиром). Он состоит из усилительной лампы и входной разделительной цепочки C_1R_1. В анодную цепь лампы включено сопротивление R_2, на котором создается падение напряжения за счет анодного тока лампы. Параметры схемы (емкость C_1 и сопротивление R_1) подобраны так, что импульс напряжения, появившийся на сопротивлении $R_н$, преобразуется в короткий остроконечный импульс, как это показано на рис. 45, *б*. Этот отрицательный импульс подается на сетку лампы, и если его величина больше, чем напряжение запирания лампы, на сопротивлении R_2 появится импульс напряжения (рис. 45, *в*), амплитуда и длительность которого практически не зависят от амплитуды входного импульса.

Постоянные по амплитуде импульсы подаются на интегрирующую цепочку, одна из возможных схем которой показана на рис. 46. Появляющиеся в анодной цепи формирующего каскада импульсы заряжают конденсатор *C* через диод *Д*; так как сопротивление диода для положительных импульсов на его аноде очень мало, заряд конденсатора будет происходить почти мгновенно. До прихода следующего импульса конденсатор может разряжаться только через сопротивление *R*, так как диод в обратном направлении тока не пропускает. Сопротивление *R* по величине выбирается

достаточно большим, чтобы разряд происходил медленно. Следующий импульс снова подзарядит конденсатор и т. д. до тех пор, пока не установится равновесие между числом подзаряжающих импульсов и скоростью разряда емкости C на сопротивление R, которому будет соответствовать

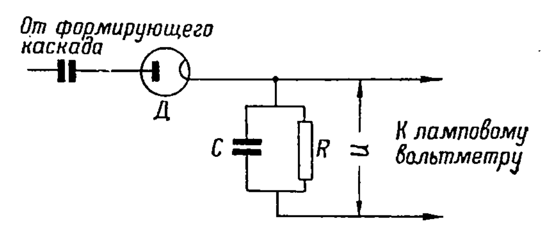


Рис. 46. Схема интегрирующей цепочки

среднее значение напряжения U на интегрирующей цепочке.

Очевидно, что это напряжение тем больше, чем больше амплитуда подзаряжающих импульсов и чем чаще они приходят. Но после формирующего каскада амплитуда импульсов остается постоянной, следовательно, величина напряжения U будет зависеть только от числа импульсов в единицу времени, что и должна была обеспечить интегрирующая цепочка.

Величину напряжения U непосредственно измерить обычными вольтметрами нельзя вследствие сравнительно большой величины сопротивления R (до 10 мегом). Для измерения этого напряжения используется ламповый вольтметр, в простейшем случае представляющий одну лампу, включенную по схеме рис. 47. На сетку лампы подано отрицательное напряжение, и ток в ее анодной цепи практически равен нулю. При появлении им-

пульсов на интегрирующей цепочке возникает напряжение, которое уменьшает смещение на сетке триода, и анодный ток его увеличивается. Если провести предварительную градуировку, то по изменению анодного тока лампы можно будет определить число импульсов от счетчика и тем самым степень заражения исследуемой поверхности.

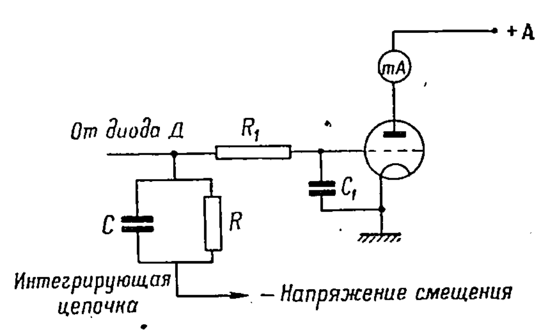


Рис. 47. Схема лампового вольтметра

Сопротивление R_1 и емкость C_1 служат для сглаживания пульсаций на выходе интегрирующей цепочки.

Вследствие того, что разряды в счетчике чередуются не через равные интервалы, а распределены во времени случайно (в соответствии с характером радиоактивного распада), напряжение на интегрирующей цепочке будет медленно колебаться около какого-то среднего значения. Эти колебания отмечаются стрелкой лампового вольтметра, и они тем больше, чем меньше число импульсов в единицу времени.

При измерении малых степеней заражения счетчик дает сравнительно небольшое количество импульсов в минуту, и для того чтобы на инте-

грирующей цепочке появилось достаточное напряжение, время разряда емкости C приходится брать большим. Постоянная времени $\tau = R \cdot C$ может в этом случае достигать 0,5—1 минуты, то есть за такое время напряжение на цепочке RC успеет возрасти только до 70% его полной величины. Отсчет показаний по регистрирующему прибору в этих случаях следует вести через 2—3 минуты после начала измерений, когда напряжение на интеграторе нарастет до 95% своей максимальной величины.

При измерении больших степеней заражения включается интегратор с меньшей постоянной времени (это достигается путем изменения величин R и C) и отсчет показаний производится быстрее.

Для питания электрической схемы радиометра обычно применяются сухие элементы и батареи. Питание газового счетчика можно осуществить от сухих батарей, однако сравнительно большое напряжение, необходимое для обеспечения нормальной работы счетчика (несколько сот вольт), требует или большого количества батарей, что увеличивает вес и габариты прибора, или применения дорогих высоковольтных малогабаритных батарей, имеющих малый срок сохранности. Возможен еще один путь — применение преобразователей, которые напряжение анодной батареи (45—80 вольт) или даже элемента накала (1,5 вольта) преобразовали бы в высокое напряжение для питания счетчика. Такие преобразователи имеют небольшие габариты, поэтому их применение значительно выгоднее, чем использование большого количества батарей.

Вышеописанную электрическую схему имеют бета-радиометры. Электрическая схема альфа-радиометра отличается прежде всего тем, что в ней

используется пропорциональный счетчик. Пропорциональный счетчик имеет значительно меньший коэффициент газового усиления, чем счетчик с самостоятельным разрядом, используемый в бета-радиометре, поэтому в альфа-радиометре имеется несколько усилительных каскадов на электронных лампах. Схема каждого такого каскада практически не отличается от схемы формирующего каскада, изображенного на рис. 44. О целесообразности применения пропорциональных счетчиков для измерения потока α-частиц мы уже говорили в главе 3.

С целью повышения удобства измерения зараженности различных поверхностей бета-радиометр выполняется в виде двух блоков — зонда и измерительного пульта. Зонд обычно представляет собой круглую алюминиевую трубу диаметром 3—4 см. В верхней части зонда монтируются некоторые элементы электрической схемы радиометра, а в нижней части (головке зонда) — газовый счетчик. При помощи кабеля длиной 1—1,5 м зонд соединяется с измерительным пультом прибора. Органы управления радиометром и электроизмерительный прибор, шкала которого проградуирована в тысячах β-распадов за минуту, выведены на переднюю панель измерительного пульта.

Головка зонда радиометра имеет некоторые конструктивные особенности, вызванные следующими причинами: часто измерения бета-зараженности производятся при наличии значительного гамма-фона [1], который также воздействует на

[1] Вне радиоактивно зараженной местности к поверхностям, имеющим значительный гамма-фон, можно отнести поверхность самолета, танка, вывезенных с зараженной местности, и другие большие поверхности.

счетчик радиометра и увеличивает показания прибора. Исключить влияние гамма-излучения на счетчик невозможно. Поэтому практически определение бета-зараженности производится путем двух измерений: 1) суммарного потока бета-частиц и гамма-квантов и 2) только потока гамма-квантов. Вычитая результаты второго измерения из первого, получим бета-зараженность поверхности. Такая последовательность измерений вы-

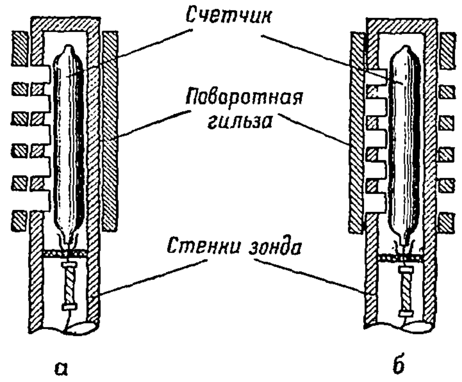


Рис. 48. Разрез головки зонда с поворотной гильзой

звана тем, что счетчик сравнительно просто можно защитить от бета-излучения, проникающая способность которого по сравнению с гамма-излучением невелика. Так, экран из алюминия толщиной 4—5 мм полностью поглощает бета-частицы, в то же время практически не ослабляя гамма-излучения.

Таким образом, головка зонда, где размещен счетчик, должна иметь подвижный экран, который закрывает счетчик при втором измерении. Конструктивно это может быть выполнено, напри-

мер, так, как показано на рис. 48, *а* и 48, *б*. Стенки зонда в месте расположения счетчика имеют вырезы (щели), идущие перпендикулярно оси зонда и занимающие несколько меньше половины окружности его стенки. Поверх зонда надета цилиндрическая гильза, которая может вращаться вокруг своей оси. Гильза также имеет щели, которые в одном из ее положений совпадают с вырезами в стенке зонда (рис. 48, *а*). В этом положении воздействуют бета-частицы, проникающие через щели, и гамма-кванты.

При повороте гильзы на 180° вырезы в стенке зонда закрываются сплошной стороной гильзы (рис. 48, *б*), в которой поглощаются бета-лучи, и на счетчик воздействуют только гамма-кванты.

Альфа-радиометр конструируется по тому же принципу, что и бета-радиометр, и имеет зонд и измерительный пульт. Альфа-счетчик в зонде размещается так, чтобы тонкое слюдяное окно его, служащее для впуска альфа-частиц внутри счетчика, находилось против торца зонда. На торец надет защитный колпачок, предохраняющий от повреждения слюдяную пленку счетчика и снимаемый только в момент измерений альфа-активности. Непосредственно за счетчиком в зонде размещаются один — два каскада усилителя импульсов. Остальные блоки альфа-радиометра размещаются в измерительном пульте, имеющем то же назначение, что и у бета-радиометра.

Порядок подготовки β-радиометра к работе такой же, как и для рентгенометра. При проведении измерений пульт прибора с помощью ремней размещается на груди оператора так, чтобы было удобно наблюдать за показаниями регистрирующего прибора. Зонд берется в руки, и его головка подносится к зараженной поверх-

ности на расстояние 1—2 см. Вырезы в зонде должны быть обращены в сторону поверхности. По регистрирующему прибору производится отсчет показаний, соответствующих бета-гамма-активности. Затем гильза поворачивается на 180°, головка ставится в то же положение, что при первом измерении, и производится отсчет показаний от гамма-фона. По разности первого и второго измерений делается заключение о величине бета-зараженности поверхности.

Если гамма-фон очень мал (составляет менее 0,1 от суммарной бета-гамма-активности), производится только одно первое измерение. Такой случай может быть при контроле за обмундированием и снаряжением личного состава, вышедшего из зараженной зоны, или при проверке отдельных предметов, продуктов питания и т. д., когда измерения производятся вне зараженной зоны.

Следует иметь в виду, что пользование радиометром в пределах зараженной зоны на открытой местности невозможно вследствие его большой чувствительности. В таких случаях оператор должен использовать защитные свойства полевых сооружений (блиндажи, землянки) и производить измерения, например, бета-зараженности обмундирования внутри сооружений. При этом необходимо учитывать фон, который зараженная местность создает внутри сооружения, вычитая его из результатов измерений зараженности поверхностей.

Радиометром можно определять также зараженность продуктов питания и воды.

Измерение зараженности продуктов питания может производиться либо непосредственно путем измерения бета-активности от поверхности тары (ящики, мешки, бочки) или поверхности продукта (мясо, хлеб и т. д.) или путем взятия проб

Пробы берутся в том случае, когда есть подозрение на возможность заражения не только верхних слоев, но и всего объема продуктов (например, зерна, круп, муки и т. д.). По результатам измерений пробы определенного веса находится зараженность на 1 грамм данного продукта.

Зараженность воды может определяться или путем погружения головки зонда в воду[1], или измерением зараженности с поверхности воды, налитой тонким слоем в какую-нибудь ванночку. По результатам измерений находится зараженность на 1 литр воды.

Градуировка прибора может производиться по эталонному источнику гамма-излучения (например, кобальт 60) или по эталонным источникам бета-излучения с различной активностью.

Градуировка по гамма-источнику производится в той же последовательности, что и для рентгенометра. Только теперь необходимо зонд размещать в точках с мощностью дозы порядка от десятых долей миллирентгена в час до нескольких десятков миллирентгенов в час. Для создания таких мощностей дозы достаточно иметь источник с активностью несколько сотых долей кюри.

Для градуировки по бета-излучению необходимо иметь набор бета-эталонов различной активности и определенного размера, установленного для данного типа радиометра. Головка зонда подносится к поверхности бета-эталона на расстояние 0,5—1 см и производится отсчет показаний. Если отклонение активности, измеренной радиометром, от истинной активности эталона находится в пределах погрешности, допустимой со-

[1] На головку зонда в этом случае надевается тонкий резиновый чехол, предохраняющий ее от заражения радиоактивными веществами, находящимися в воде.

гласно инструкции к прибору, градуировка считается правильной. В противном случае необходима регулировка чувствительности прибора.

Градуировка прибора обязательно проверяется после смены газового счетчика и лампы лампового вольтметра.

* * *

Таким образом, основными приборами радиационной разведки и дозиметрического контроля являются рентгенометры, радиометры и дозиметры. Наличие этих приборов и правильное их обслуживание позволят войскам успешно выполнять боевые задачи на радиоактивно зараженной местности.

Одним из основных условий правильного использования дозиметрических приборов является знание основных свойств радиоактивных излучений и принципов работы этих приборов.

Атомное оружие является более мощным, чем обычные виды оружия, но и от него имеются надежные средства защиты. Одним атомным оружием решить исход войны нельзя. Исход войны в конечном счете будут решать люди, сильные духом, вооруженные передовой техникой и мастерски владеющие ею. Весь личный состав Советской Армии и Военно-Морского Флота должен непрерывно изучать свойства атомного оружия, знать его поражающие факторы, постоянно совершенствовать противоатомную защиту и находиться в постоянной боевой готовности к ведению боевых действий в условиях применения атомного оружия.

Цена 1 р. 75 к.

